

WILSON ALCÂNTARA SOARES

**DETERMINAÇÃO DA MATRIZ DE UM SISTEMA
ÓPTICO POR UM PROCESSO
FOTOGRAMÉTRICO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências pela Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Quintino Dalmolin

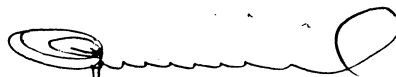
CURITIBA
1995

DETERMINAÇÃO DA MATRIZ DE UM SISTEMA ÓPTICO
POR UM MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO

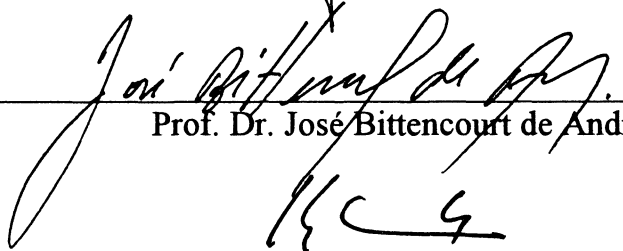
por

WILSON ALCÂNTARA SOARES

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Ciências no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pela comissão formada pelos professores.



Prof. Dr. Quintino Dalmolin - orientador



Prof. Dr. José Bittencourt de Andrade



Prof. Dr. Cristiano Johannes Friedrich Graf

ORIENTADOR
QUINTINO DALMOLIN

- Doutor em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná.
- Professor Titular do Departamento de Geociências do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

**A Wilson e Bijuca,
a quem eu sigo**

**Guilherme, Luciano e Eduardo,
os que me seguirão**

AGRADECIMENTOS

Mariester Malvezzi, pelo grande incentivo e apoio ao retorno à este trabalho.

Carlos Aurélio Nadal, Silvia Helena Soares Schwab, Márcia Cristina Lopes Quintas e Hamilton Araujo Bicalho, pelo incentivo e constante apoio para a realização deste trabalho.

Mara Cristina Sampaio Taracievicz, que muito dedicou à revisão do texto, tradução e discussão do trabalho.

Sergio Mauri Fabri e Wanda Cristina Camargo grandes amigos que muito me incentivaram.

Prof. Renê Robert, cujas sugestões em muito auxiliaram o desenvolvimento desta dissertação.

Prof. Hans Peter Bähr, a primeira pessoa com quem discuti a proposta deste trabalho e que muito me incentivou à começá-lo.

Eliane Maria Stroparo, pelo excelente trabalho de orientação e revisão das referências bibliográficas, feito com competência e simpatia.

Prof. Dr. José Bittencourt de Andrade, pelas precisas orientações no início deste trabalho.

Prof. Quintino Dalmolin, que com grande paciência e sabedoria, teve papel preponderante para que fosse possível a conclusão dos trabalhos, com as suas brilhantes sugestões e orientações.

Meus irmãos, Antônio, Anive e Orlando, em nome de nossa família, que de muitas formas foi posta de lado quando do desenrolar deste trabalho.

Meus filhos Guilherme, Luciano e Eduardo, pelo carinho que me deram em todo este tempo a eles negligenciado.

SUMÁRIO

	Página
SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
ANEXOS	xiv
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1.	INTRODUÇÃO.....	01
1.2.	OBJETIVOS.....	03
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	04
1.3.1.	CAPÍTULO PRIMEIRO : INTRODUÇÃO.....	04
1.3.2.	CAPÍTULO SEGUNDO : CONCEITOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA.....	04
1.3.3.	CAPÍTULO TERCEIRO : PROGRAMAS COMPUTACIONAIS.....	04
1.3.4.	CAPÍTULO QUARTO : EXPERIMENTOS E SIMULAÇÕES.....	05
1.3.5.	CAPÍTULO QUINTO : INFLUÊNCIA DOS ERROS DE MEDIDA.....	05
1.3.6.	CAPÍTULO SEXTO : O CAMPO DE PROVAS.....	05
1.3.7.	CAPÍTULO SÉTIMO : CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	05
1.3.8.	CAPÍTULO OITAVO : REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	05

CAPÍTULO II

CONCEITOS DE ÓPTICA GEOMÉTRICA

2.1.	LEI DE SNELL-DESCARTES.....	06
2.1.1.	REFRAÇÃO.....	06
2.1.2.	ÍNDICE DE REFRAÇÃO.....	06
2.1.3.	A LEI DE SNELL DESCARTES.....	07
2.2.	ABERTURA DO DIAFRAGMA.....	08
2.3.	PROFUNDIDADE DE FOCO.....	11
2.3.1.	CÍRCULO DE CONFUSÃO.....	11
2.3.2.	A PROFUNDIDADE DE FOCO.....	12
2.3.3.	FATORES DE INFLUÊNCIA.....	13
2.4.	MATRIZES DO SISTEMA ÓPTICO.....	15
2.4.1.	AS MATRIZES DE APLICAÇÃO.....	15
2.4.2.	MATRIZ DE TRANSMISSÃO.....	15
2.4.3.	MATRIZ DE REFRAÇÃO.....	18
2.5.	APLICAÇÃO DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO.....	21
2.5.1.	SISTEMA DE UMA ÚNICA LENTE.....	21
2.5.2.	SISTEMA COM VÁRIAS LENTES.....	23
2.5.2.1.	SISTEMA COM DUAS LENTES.....	23
2.6.	MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO.....	25
2.7.	DETERMINANTE DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO.....	29

CAPÍTULO III

PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

3.1.	FLUXOGRAMA DAS OPERAÇÕES.....	33
3.2.	SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ÓPTICO.....	36
3.2.1.	PROGRAMA COMPUTACIONAL SISTEMA.FOR.....	37
3.3.	PONTOS DO ESPAÇO OBJETO E IMAGEM.....	37
3.3.1.	MODELO MATEMÁTICO.....	38
3.3.2.	PROGRAMA COMPUTACIONAL PONTOS.FOR.....	39
3.4.	DETERMINAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO....	40
3.4.1.	MODELO MATEMÁTICO PARA A DETERMINAÇÃO DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO.....	40
3.5.	MÉTODO COMBINADO DE AJUSTAMENTO.....	44
3.5.1.	MODELO MATEMÁTICO DE AJUSTAMENTO.....	44
3.5.2.	MODELO MATEMÁTICO LINEARIZADO.....	45
3.5.3.	MATRIZES PARA O AJUSTAMENTO.....	47
3.5.4.	ITERAÇÕES.....	50
3.5.5.	PROGRAMA COMPUTACIONAL MATRIZ.FOR.....	51

CAPÍTULO IV

EXPERIMENTOS E SIMULAÇÕES

4.1.	EXPERIMENTO Nº 1.....	53
4.1.1.	DETERMINAÇÃO GEOMÉTRICA DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO.....	53
4.1.1.1.	SISTEMA DE UMA SÓLENTE.....	53
4.1.2.	DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DO ESPAÇO OBJETO E IMAGEM.....	55

4.1.3.	DETERMINAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO....	57
4.1.3.1.	MONTAGEM DO ARQUIVO XISZERO.DAT.....	57
4.1.3.2	APLICAÇÃO DO PROGRAMA MATRIZ.FOR.....	58
4.1.4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	58
4.1.5.	TESTE COM NOVOS PARÂMETROS INICIAIS.....	59
4.1.6.	TESTE COM NOVO PESO.....	61
4.1.7.	TESTES COM VÁRIAS PRECISÕES PARA AS ITERAÇÕES.....	62
4.2.	EXPERIMENTO Nº 2.....	63
4.2.1.	TESTE COM UMA NOVA LENTE.....	63
4.2.1.1.	DADOS DO SISTEMA ÓPTICO.....	63
4.2.1.2.	PONTOS DO ESPAÇO OBJETO E IMAGEM.....	64
4.2.1.3.	PARÂMETROS INICIAIS.....	65
4.2.1.4.	CÁLCULO DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO.....	66
4.2.2.	TESTE PARA UM NOVO CONJUNTO DE PONTOS.....	66
4.2.2.1.	PONTOS DO ESPAÇO OBJETO E IMAGEM.....	67
4.2.2.2.	APLICAÇÃO DO MÉTODO.....	67
4.3.	EXPERIMENTO Nº 3.....	68
4.3.1.	ESTUDO DA DISPOSIÇÃO DOS PLANOS QUE CONTÉM OS OBJETOS.....	68
4.3.1.1.	PONTOS ALVO.....	69
4.3.1.2.	APLICAÇÃO DO MÉTODO.....	69
4.3.2.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	70
4.3.3.	INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE OS PLANOS DOS OBJETOS.....	71
4.3.3.1.	PRIMEIRO CASO.....	71
4.3.3.2.	SEGUNDO CASO.....	72
4.3.3.3.	TERCEIRO CASO.....	73
4.3.3.4.	QUARTO CASO.....	73
4.3.3.5.	QUINTO CASO.....	74

4.3.3.6.	SEXTO CASO.....	75
4.3.3.7.	SÉTIMO CASO (TODOS OS PONTOS OBJETO EM UM ÚNICO PLANO).....	76
4.3.3.8.	ANÁLISE.....	77

CAPÍTULO V

INFLUÊNCIA DOS ERROS DAS MEDIDAS

5.1.	INFLUÊNCIA DOS ERROS DE MEDIDA QUANDO OS PONTOS OBJETOS ESTÃO DISPOSTOS EM DOIS PLANOS.....	77
5.1.1.	Teste 1 (Efeito na Distância do Objeto Até a Lente).....	77
5.1.2.	Teste 2 (Efeito na Distância da Imagem Até a Lente).....	77
5.2.	INFLUÊNCIA DOS ERROS DE MEDIDA QUANDO OS PONTOS OBJETOS ESTÃO POSICIONADOS EM QUATRO PLANOS DISTINTOS.....	79
5.2.1.	Teste 1 (Efeito na Distância do Objeto Até à Lente).....	79
5.2.2.	Teste 2 (Efeito na Distância da Imagem Até à Lente).....	79
5.2.3.	Teste 3 (Efeito na Cota do Objeto).....	80
5.2.4.	Teste 4 (Efeito na Cota da Imagem).....	81
5.3.	TESTE COM NOVO CONJUNTO DE PONTOS.....	82
5.3.1.	Teste 1 (Efeito na Distância do Objeto Até à Lente).....	82
5.3.2.	Teste 2 (Efeito na Distância da Imagem Até à Lente).....	83
5.3.3.	Teste 3 (Efeito na Cota do Objeto).....	84
5.3.4.	Teste 3 (Efeito na Cota da Imagem).....	84

CAPÍTULO VI

O CAMPO DE PROVAS

6.1.	EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO POSSÍVEIS DE SEREM UTILIZADOS.....	86
6.1.1.	Interferômetro à Laser.....	87
6.1.2.	Medidores de Coordenadas Tridimensionais.....	88
6.1.2.1.	Medidor para Peças Com Tamanho Até 0,46x0,28x0,355m.....	88
6.1.2.2.	Medidor para Peças Com Tamanho Até 3x2x1m.....	88
6.1.3.	Aparelho de Medição de Coordenadas Planas (Monocomparador).....	89
6.2.	EQUIPAMENTOS A SEREM CONSTRUÍDOS.....	89
6.2.1.	Alvo (Espaço Objeto).....	90
6.2.2.	Carro de Medição da Distância do Objeto Até à Lente	91
6.2.3.	Carro de Medição da Distância da Imagem Até à Lente	91
6.2.4.	Câmara para a Fixação da Objetiva e Tomada das Fotos.....	92
6.3.	SEQUÊNCIA DAS OPERAÇÕES PARA AS MEDIÇÕES.....	94
6.3.1.	Espaço Objeto.....	94
6.3.2.	Espaço Imagem.....	96

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1.	CONCLUSÕES.....	99
7.2.	RECOMENDAÇÕES.....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura	2.1	.....	07
Figura	2.2	.....	08
Figura	2.3	.....	10
Figura	2.4	.....	12
Figura	2.5	.....	13
Figura	2.6	.....	14
Figura	2.7	.....	16
Figura	2.8	.....	17
Figura	2.9	.....	19
Figura	2.10	.....	22
Figura	2.11	.....	24
Figura	2.12	.....	25
Figura	2.13	.....	28
Figura	3.1	.....	33
Figura	3.2	.....	39
Figura	3.3	.....	40
Figura	4.1	.....	67
Figura	6.1	.....	87
Figura	6.2	.....	90
Figura	6.3	.....	91
Figura	6.4	.....	92
Figura	6.5	.....	93
Figura	6.7	.....	94

Figura	6.8	.....	95
Figura	6.9	.....	95
Figura	6.10	.....	96
Figura	6.11	.....	97
Figura	6.12	.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela	3.1	DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS.....	34
Tabela	3.2	.VALORES DE χ^2 PARA VÁRIOS NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA.....	48
Tabela	4.1	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	56
Tabela	4.2	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA NOVOS PARÂMETROS INICIAIS.....	58
Tabela	4.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA NOVO PESO.....	60
Tabela	4.4	TESTE COM VÁRIOS CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA.....	60
Tabela	4.5	COMPARAÇÃO PARA NOVOS PONTOS OBJETO.....	66
Tabela	4.6	PONTOS OBJETO DISPONTOS EM VÁRIOS PLANOS.....	69
Tabela	5.1	EFEITO NA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE.....	77
Tabela	5.2	EFEITO NA DISTÂNCIA DA IMAGEM ATÉ A LENTE.....	78
Tabela	5.3	EFEITO NA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE.....	79
Tabela	5.4	EFEITO NA DISTÂNCIA DA IMAGEM ATÉ A LENTE.....	80
Tabela	5.5	EFEITO NA COTA DO OBJETO.....	80
Tabela	5.6	EFEITO NA COTA DA IMAGEM.....	81
Tabela	5.7	EFEITO NA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE.....	82

ANEXOS

ANEXO 1	SISTEMA.FOR..	100
ANEXO 2	PONTOS.FOR.....	102
ANEXO 3	MATRIZ.FOR.....	103
ANEXO 4	PFOCO.FOR.....	109
ANEXO 5	MATQUI.FOR.....	110
ANEXO 6	LENTE.DAT.....	116
ANEXO 7	RELAT.DAT.....	116
ANEXO 8	SISTEMA.DAT.....	116
ANEXO 9	PTOBJ.DAT.....	117
ANEXO 10	PONTOS.DAT.....	117
ANEXO 11	XISZERO.DAT.....	117
ANEXO 12	MOORE M-18.....	118
ANEXO 13	LEITZ PMM.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		123

RESUMO

A matriz de um sistema óptico pode ser determinada através do conhecimento dos elementos físicos e geométricos das lentes, os quais são: os raios das suas superfícies esféricas, as espessuras de cada lente, as distâncias entre elas e o índice de refração de cada material de que elas são feitas.

Esta matriz tem os seus elementos dependentes de cada um dos fatores acima e ela corresponde à "identidade" do sistema óptico. A variação em um deles é suficiente para mudar os elementos da matriz.

Muitas informações são expressas, ao mesmo tempo, nos quatro elementos desta matriz. Então, eles devem conter informações sobre distorções do sistema óptico, quando determinadas por um processo fotogramétrico.

Um estudo cuidadoso da matriz do sistema óptico deve trazer novos modelos para o tratamento destas distorções.

Este trabalho apresenta um processo fotogramétrico para determinar esta matriz, onde o sistema óptico é considerado como um bloco. Não é importante saber sobre as suas partes internas. Esta matriz é calculada por meio do conhecimento dos pontos do terreno (espaço objeto) e seus correspondentes pontos na fotografia (espaço imagem).

Com o propósito de verificar a viabilidade de aplicação deste método, os erros que podem ser cometidos são analisados nos processos de medição.

Como conclusão, com o uso de equipamentos, de catálogos técnicos, é possível aplicar este método. Também é sugerida a construção de equipamentos especialmente desenvolvidos para a determinação da matriz do sistema óptico pelo método fotogramétrico.

ABSTRACT

The optical system matrix can be determined through the knowledge of the lens physical and geometrical elements, which are: its spherical surface radius, the thickness of each lens, the distance between them and the refraction index of the materials they are composed of.

This matrix has its elements depending on each one of the factors above and they correspond to the "identity" of the optical system. The variation of one of them is enough to produce changes in the matrix elements.

Many information are expressed, at the same time, in the four elements of this matrix. So that, they should have an information about distortions of the optical system, when determined by a photogrammetric process.

This work presents a photogrammetric process to determine this matrix, where the optical system is considered like a block. It is not important to know its inner components. This matrix is calculated through the knowledge of the ground points (the object space) and its corresponding points in the photography (image space).

With the purpose of verifying the viability of application of this method, the errors that can be undertaken are analyzed in the measuring processes.

As a conclusion, with the use of the equipment from some technical catalogs, it is possible to apply this method. Besides this, it is suggested the construction of some equipment specially developed for the optical system matrix determination by the photogrammetric method.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

O estudo da óptica geométrica para sistemas ópticos simples, tais como aqueles constituídos por uma lente delgada¹ não apresenta grande dificuldade. Contudo, quando se parte para a análise de um sistema mais complexo, com várias lentes delgadas e, principalmente quando as espessuras das lentes não são negligenciáveis, como por exemplo nas objetivas das máquinas fotográficas modernas, métricas² ou não, seguir o comportamento das imagens de objetos que sucessivamente são formadas, lente por lente, através da objetiva, é de grande dificuldade. A quantidade de equações e incógnitas cresce consideravelmente e, além disso, em algumas câmaras ao se efetuar a focalização do objeto, a posição relativa entre as lentes varia, dificultando ainda mais o equacionamento.

O rastreamento do raio luminoso que atravessa um sistema óptico caracteriza uma técnica de análise chamada *ray tracing*. Segundo Eugene HERCHT(1990, p. 215) esta técnica é inquestionavelmente uma das melhores ferramentas de trabalho no projeto de sistemas ópticos.

De acordo com Max BORN e Emil WOLF (1964, p. 190), no projeto de instrumentos ópticos é necessário determinar a trajetória da luz com maior acuracidade do que aquela dada pela óptica Gaussiana. Isto pode ser feito por análise algébrica, levando em conta os termos de mais alta ordem na expansão das funções características. Alternativamente, uma maneira de determinar a trajetória dos raios luminosos com precisão é recorrer à geometria elementar, por sucessivas aplicações das leis da refração (ou reflexão). Este método é conhecido como *ray tracing* e é muito usado na prática.

¹Lente considerada de espessura desprezível. Os pontos nodais anterior e posterior são coincidentes.

²Também chamadas de Câmaras Cartográficas, são aquelas que possuem os elementos de orientação interior conhecidos com alta precisão.

Atualmente, a aplicação de programas computacionais em muito ajudam na solução destes sistemas ópticos, facilitando o rastreo do raio luminoso, resolvendo as inúmeras equações que surgem com a aplicação da óptica geométrica.

Na década de 30, T. Smith formulou a maneira mais interessante de trabalhar com a técnica *ray tracing* e com as equações que surgem com a aplicação desta técnica, devido à forma linear simples e à repetitividade com que essas equações aparecem, ele desenvolveu um método onde são utilizados operadores matriciais no lugar das equações tradicionais. Este método é conhecido como o Método Matricial, onde, somente nos anos 60 é que ele passou a ser mais estudado e teve a sua aplicação mais difundida. Neste método, depois de conhecidas as matrizes que caracterizam a ocorrência de cada um dos fenômenos ópticos envolvidos, pode-se substituir todo o sistema óptico por somente uma matriz, a matriz do sistema óptico.

Embora o método matricial use em larga escala a álgebra matricial, preponderando o produto matricial, mesmo nos sistemas ópticos mais complexos tem-se uma diminuição das dificuldades que normalmente se teria, fosse por análise algébrica ou por óptica geométrica convencional, visto que todas as matrizes são de ordem 2×1 ou 2×2 e, principalmente em nossos dias, quando se pode contar com o auxílio de computadores.

A determinação da matriz do sistema óptico, é feita por meio dos elementos geométricos e dos elementos físicos das lentes que o compõem. Os elementos geométricos são os raios de curvatura de cada superfície das lentes, as espessuras das lentes e as distâncias entre elas. Os elementos físicos são os índices de refração de cada lente do sistema. Segundo Robert EISBERG e Lawrence LERNER (1981, p. 1417) e Klaus HALBACH (1964), como a matriz do sistema óptico é portadora de elementos calculados a partir dos elementos que caracterizam a lente, com ela, pode-se determinar outros elementos de grande importância, como por exemplo, a distância focal da lente.

Quando um raio luminoso percorre um sistema óptico, dois fenômenos físicos básicos ocorrem no seu trajeto: a refração e a transmissão. Para caracterizar cada um desses fenômenos associa-se uma matriz que o representa. Assim, a matriz do sistema óptico é obtida pela adequada multiplicação dessas matrizes. Verifica-se então que a maior dificuldade não está na aplicação do método, mas sim na determinação de cada uma das matrizes que são utilizadas para a determinação da matriz do sistema óptico.

Em alguns sistemas ópticos, ao se efetuar a focalização, ocorre deslocamento entre as lentes que constituem esse sistema, uma em relação a outra. Ora, como a distância entre cada uma das lentes influi na matriz do sistema óptico, em cada focalização, novas matrizes relativas à distância entre as lentes são formadas, fazendo com que se tenha uma nova matriz

para representar todo o sistema óptico. Verifica-se que é praticamente impossível o conhecimento da matriz do sistema óptico para cada uma das focalizações³.

Nos casos das câmaras fotogramétricas aéreas, supondo as suas objetivas suficientemente estáveis⁴, todo o sistema óptico é rígido, fazendo com que ao se determinar a matriz desse sistema, a mesma seria invariável⁵. Nas câmaras terrestres isto já não ocorre, pois ao se focalizar um determinado plano de trabalho, são mudadas as distâncias entre algumas das lentes constituintes do sistema óptico, fazendo com que seja impossível determinar a matriz do sistema óptico para aquela situação de tomada da foto.

Visando dar condições de se conhecer a matriz do sistema óptico de uma objetiva, sem a necessidade de conhecer os seus elementos internos, propõe-se um método fotogramétrico para a determinação desta matriz, onde apenas é necessário que se conheça as coordenadas de pontos no espaço objeto e as correspondentes coordenadas no espaço imagem.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho visa determinar a matriz do sistema óptico de uma lente ou de um sistema de lentes (objetiva) de uma câmara fotográfica por um método fotogramétrico, sem levar em conta elementos internos à objetiva, como tradicionalmente é feito.

No processo proposto, faz-se uma análise crítica dos limites de precisão que devem ser respeitados, quanto aos equipamentos de medição de distância para o posicionamento dos pontos de prova em laboratório e a precisão das medidas a serem efetuadas sobre as fotografias, para que os resultados obtidos sejam compatíveis com os objetivos pré estabelecidos.

Também neste trabalho faz-se uma análise do comportamento dos sistemas ópticos ao se utilizar as matrizes dos sistemas, visando a verificação da eficiência de seu uso nos seguintes casos:

a) mantendo constante a distância do objeto até a lente e o tamanho do objeto fotografado e, variando a direção do raio luminoso que parte do objeto⁶;

³ Para conhecer as distâncias entre as lentes seria necessário um sistema mecânico complexo que mostraria, externamente ao sistema óptico, a posição de cada lente com precisão, o que além de encarecer o sistema, o tornaria significativamente mais complexo.

⁴ São aquelas cujo sistema mecânico de suporte das lentes é bastante rígido e bem ajustado para manter fixas as lentes do sistema óptico, por um tempo significativamente longo.

⁵ No caso de câmaras aéreas, determinações sistemáticas da matriz do sistema óptico poderiam indicar a necessidade de calibração da câmara, caso esta matriz esteja variando com o passar do tempo.

⁶ Na técnica *ray tracing*, rastreia-se um raio luminoso que parte do objeto com direção θ e cota y .

b) mantendo constante o tamanho do objeto e a direção do raio e, variando a sua distância até a objetiva;

c) mantendo constante a direção do raio luminoso e a distância do objeto até a objetiva, variando o tamanho do objeto.

1.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido em capítulos da seguinte forma:

1.3.1 - CAPÍTULO PRIMEIRO : INTRODUÇÃO

Trata-se da introdução, dos objetivos do trabalho e da descrição do corpo do trabalho.

1.3.2 - CAPÍTULO SEGUNDO : CONCEITOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA

Neste capítulo foi abordada a revisão bibliográfica onde foram vistos os fenômenos físicos ópticos e as leis que os regem. Alguns elementos de fundamental importância são conceituados, a saber; o círculo de confusão, a profundidade de foco e os fatores que influenciam esta.

As matrizes dos sistemas ópticos são obtidas a partir de outras matrizes que caracterizam alguns fenômenos ópticos físicos e, em virtude disso, são definidas as matrizes de refração e transmissão.

1.3.3 - CAPÍTULO TERCEIRO : PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Vários programas computacionais e arquivos de dados são utilizados durante a aplicação do método. No capítulo terceiro procura-se organizar a seqüência de aplicação destes programas por meio de um fluxograma de operações e da descrição de cada programa e dos seus respectivos arquivos de entrada e saída de dados.

Neste capítulo também são mostrados os modelos matemáticos utilizados nos processamentos computacionais e é descrito o modelo matemático de ajustamento para a linearização do modelo.

1.3.4 - CAPÍTULO QUARTO : EXPERIMENTOS E SIMULAÇÕES

Os experimentos e as simulações apresentadas neste capítulo visam mostrar a aplicação do método para uma possível situação onde, inicialmente, calcula-se a matriz de um sistema óptico proposto geometricamente e posteriormente fotogrametricamente. De posse dos dois resultados, faz-se a análise comparativa entre os resultados obtidos por ambos os métodos e aplica-se o teste estatístico de Qui-quadrado, para que se tenha uma quantização da qualidade dos resultados obtidos.

O método é repetido para algumas situações, com diferentes parâmetros iniciais, diferentes sistemas ópticos e sobre diferentes pontos (alvos), visando dar subsídios para uma aplicação em que se julgue ter boas condições para a aplicabilidade do método.

1.3.5 - CAPÍTULO QUINTO : INFLUÊNCIA DOS ERROS DAS MEDIDAS

Em todo o processo de medição são cometidos erros. Neste capítulo procura-se ter uma idéia do erro que se pode cometer e os seus efeitos sobre os resultados finais também com as respectivas análises estatísticas.

Procura-se, a partir de condições ideais, isto é, isentas de erros, acrescentar-se gradativamente erros nas medidas. Após o processamento verifica-se o resultado e as informações relativas ao teste estatístico visando concluir se o resultado foi satisfatório ou não, e com isso, ter-se uma idéia dos limites de aplicação do método.

1.3.6 - CAPÍTULO SEXTO : O CAMPO DE PROVAS

É feita uma proposta de montagem do campo de provas em função da precisão de equipamentos existentes. Também é feita a sugestão da construção de alguns equipamentos auxiliares.

1.3.7 - CAPÍTULO SÉTIMO : CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Para finalizar o trabalho, são apresentadas as conclusões e sugestões para a aplicabilidade do método bem como de trabalhos que podem ser desenvolvidos como prosseguimento deste.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS DE ÓPTICA GEOMÉTRICA

2.1 - LEI DE SNELL - DESCARTES

2.1.1 REFRAÇÃO

De acordo com Paul WOLF (1974,p. 22) o fenômeno óptico da refração corresponde à mudança de velocidade que a luz sofre ao mudar de meio de propagação¹, dependendo da natureza desses meios. Quando o raio luminoso atinge a superfície de separação dos dois meios com direção não normal à mesma, como consequência da mudança da sua velocidade, ele sofre um desvio na sua trajetória (fig. 2.1).

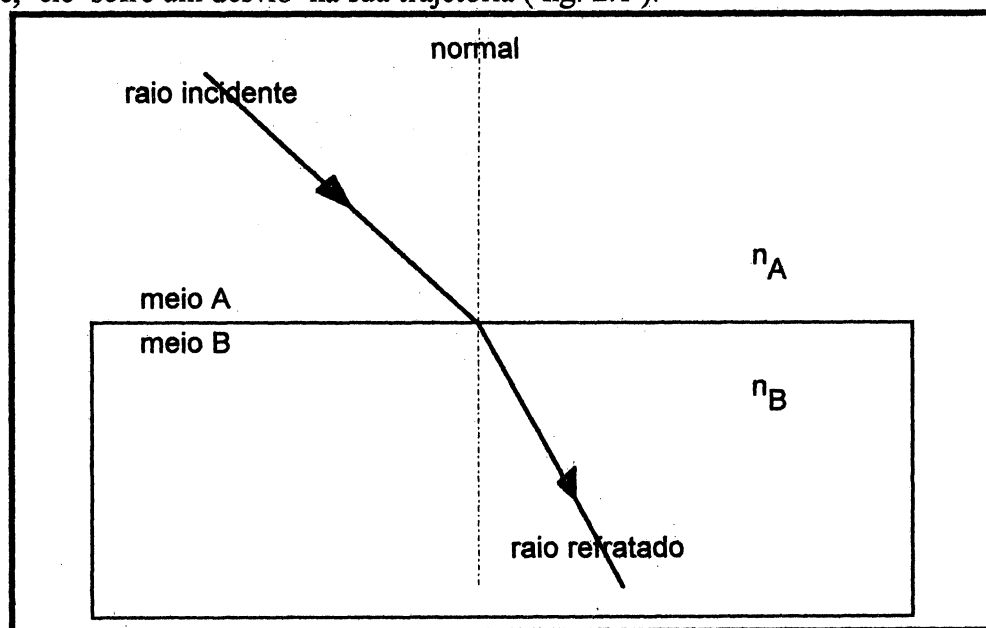


fig. 2.1

2.1.2 ÍNDICE DE REFRAÇÃO

A velocidade da luz no vácuo² é aproximadamente 300.000 km/s. Em um meio material, a luz tem a sua velocidade diminuída. Para caracterizar o comportamento da luz em cada meio transparente e isotrópico³, define-se o índice de refração absoluto n , como sendo a

¹Quando o ângulo de incidência é diferente de zero graus, ocorre mudança na intensidade e na direção da velocidade. Para ângulo de incidência de zero graus somente a intensidade da velocidade varia.

² Segundo Oswald BLACKWOOD, Willian KELLY e Raymond BELL(1963, 685 p.) a velocidade da luz no vácuo é de 299.790 km/s, com erro de 1/750%.

³ Mesmas propriedades ópticas em todas as direções.

razão entre a velocidade da luz no vácuo c , e a velocidade da luz nesse meio v . Portanto, para um meio A de propagação, de acordo com Paul WOLF(1974, p. 22), tem-se que:

$$n_A = \frac{c}{v_A} \quad (2.1)$$

Quando dois meios possuem uma fronteira comum, a relação entre os seus índices de refração é denominada de índice de refração relativo, o qual é obtido pela razão entre o índice de refração absoluto do meio para onde o raio luminoso está indo e do meio de onde o raio luminoso provém (fig. 2.2):

$$n_{AB} = \frac{n_B}{n_A} \quad (2.2)$$

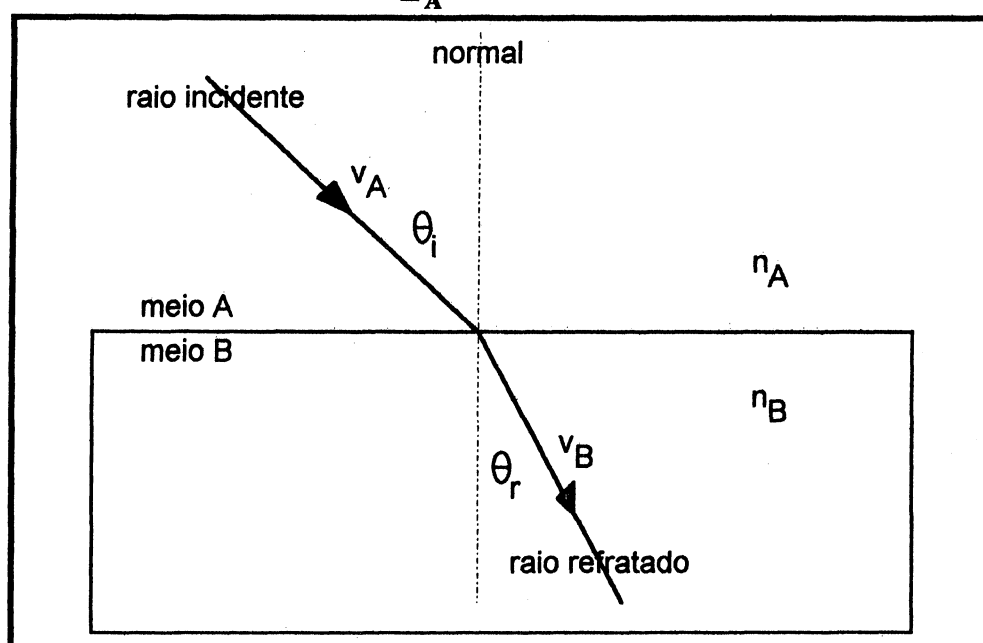


FIG 2.2

2.1.3 - A LEI DE SNELL - DESCARTES

A lei da refração foi descoberta experimentalmente por Willebrod Snell (1591-1629) e, deduzida da primitiva teoria corpuscular da luz, por René Descartes (1596-1650). Por este motivo ela é conhecida como lei de Snell⁴ e como lei de Descartes⁵ , ou ainda como lei de Snell-Descartes.

Verifica-se, pela equação 2.1, que quanto maior o índice de refração absoluto de um meio, menor será a velocidade da luz neste meio. Também é verificado que quanto menor a velocidade da luz em um meio, mais o raio luminoso se aproxima da normal (fig. 2.2), onde

⁴ Nos Estados Unidos da América

⁵ Na França

tal comportamento só ocorrerá se o índice de refração do meio 2 for maior que o índice de refração do meio 1. Neste caso o ângulo de refração será menor que o ângulo de incidência e existirá uma relação direta entre os senos dos ângulos de incidência e de refração e as velocidades da luz incidente e refratada. De acordo com David HALLIDAY e Robert RESNICK(1966, p.1155) e Marcelo ALONSO e Edward FINN(1972, p. 348), a lei de Snell é dada por:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_A}{v_B} \quad (2.3)$$

Das equações 2.1 e 2.2, pode-se obter a relação entre as velocidades nos meios A e B.

$$n_{AB} = \frac{n_B}{n_A} = \frac{\frac{c}{v_A}}{\frac{c}{v_B}} = \frac{v_B}{v_A}$$

ou ainda, com o uso da equação 2.3;

$$\frac{n_B}{n_A} = \frac{v_A}{v_B} = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r}, \text{ de onde se expressa a lei}$$

procurada,

$$n_{AB} = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} \quad (2.4)$$

A equação 2.4 permite determinar o índice de refração do meio A em relação ao meio B. No caso em que o meio B seja o vácuo, ou mesmo o ar, pode-se referenciar o índice n_{AB} como sendo o índice de refração do meio A em relação ao vácuo (ou ar), como índice de refração absoluto de A ou ainda, simplesmente, por índice de refração de A.

2.2 - ABERTURA DO DIAFRAGMA

O diâmetro efetivo da objetiva é controlado por um diafragma⁶. Para quantizar esta abertura, faz-se uso da razão entre a distância focal (f) do sistema óptico e o diâmetro (D) da abertura do diafragma (fig. 2.3);

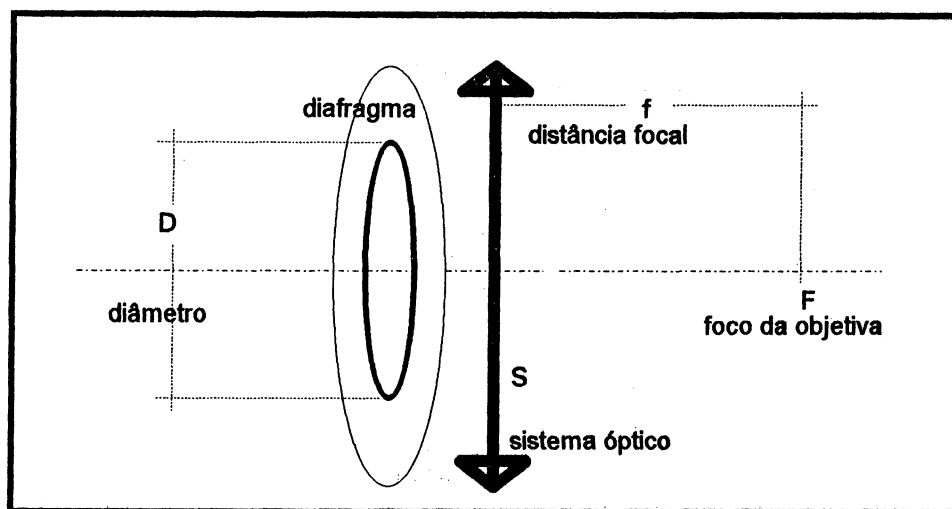


fig. 2.3

Segundo FOTOGRAFIA (1976,p. 102) e MANUAL OF PHOTOGRAMMETRY (1980, p. 946), a abertura do diafragma (n_f), é definida por:

$$n_f = \frac{f}{D} \quad (2.5)$$

A abertura do diafragma é usada, fundamentalmente, para controlar a quantidade de luz que penetra na objetiva de uma câmera fotográfica. A quantidade de luz, de acordo com Bertil HALLERT (1960, p. 43), que penetra na objetiva também é controlada pelo obturador⁷. O controle da abertura do diafragma pode ser feito na própria objetiva da máquina fotográfica onde, para cada variação de "um ponto", a extensão da abertura do diafragma dobra de área se o diafragma for aberto, ou diminui à metade se ele for fechado. Abaixo, é mostrado como o

⁶ Dispositivo que controla a extensão da abertura por onde a luz penetra na objetiva.

⁷ Dispositivo que controla o tempo de entrada da luz que atravessa o sistema óptico.

diâmetro varia quando a abertura varia em "um ponto". Inicialmente tem-se uma área A_1 , dada por:

$$A_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \quad (2.6)$$

supondo que houve abertura de "um ponto", a nova área passa ser o dobro da inicial:

$$A_2 = 2 \cdot A_1 \quad (2.7)$$

porém,

$$A_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \quad (2.8)$$

das eq. 2.6 , 2.7 e 2.8 tira-se que:

$$\frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot D_1^2}{4} , \text{ ou seja:}$$

$$D_2 = D_1 \cdot \sqrt{2} . \quad (2.9)$$

Isto significa que ao se multiplicar o diâmetro do diafragma por $\sqrt{2}$, a área efetiva da objetiva fica multiplicada por 2, conseqüentemente, o dobro da quantidade de luz atravessa a objetiva da máquina fotográfica, atingindo a película fotosensível, para que seja possível o registro da imagem fotográfica.

Os números " f " mais comumente usados são: f/1.0 , f/1.4, f/2, f/2.8, f/4, f/5.6, f/8, f/11, f/16, f/22, f/32, f/45 e f/64. A maior abertura do diafragma corresponde ao f/1.0, onde se tem a maior quantidade de luz adentrando à objetiva (na prática diz-se que f/1.0 é o mais luminoso). A cada número "f" que se segue, a partir de 1.0, a quantidade de luz é reduzida a metade. Desse modo, uma objetiva ajustada para f/2 admite a metade da luz de uma objetiva ajustada para f/1.4 e apenas um quarto da luz de uma objetiva ajustada para f/1.0.

A variação de luz através de toda a escala do diafragma é enorme, onde por exemplo, uma objetiva cujo diafragma é fechado para f/64 admite aproximadamente 1/2000 da

intensidade luminosa que penetra em uma objetiva regulada para $f/1.4$. A sequência dos numeradores é obtida com as sucessivas multiplicações pela raiz quadrada de dois, o que significa reduzir, a cada operação, à metade, a quantidade de luz que atravessa a objetiva da máquina fotográfica.

2.3 - PROFUNDIDADE DE FOCO

2.3.1 CÍRCULO DE CONFUSÃO

O círculo de confusão é definido como sendo o menor círculo que pode ser visto sem que ele seja confundido com um ponto. Para uma pessoa normal, que observa círculos à distância de 25 cm dos olhos, sem auxílio de instrumentos, o círculo de confusão tem diâmetro de 0,25 mm (250 μm). Qualquer outro círculo com diâmetro menor que o do círculo de confusão é observado como sendo um ponto (fig. 2.4). Nos equipamentos ópticos de medição, a fim de melhorar a pontaria, normalmente é feita uma ampliação da imagem em 5 vezes, o que permite observar pontos 5 vezes menores, caracterizando então a definição de um círculo de confusão menor. Com isso pode-se aumentar a precisão no posicionamento da marca flutuante nos instrumentos de medidas fotogramétricas, pois o círculo de confusão passa a ter diâmetro de 0,05mm ou 50 μm .

Segundo Wilfred BAKER (1960, p. 4), o princípio de aplicação da marca flutuante foi descoberto em 1892 por F. Stolze e adaptado para instrumentos de medição por C. Pulfrich. Todos os modernos restituidores estereoscópicos e os instrumentos de medidas utilizam este princípio. Normalmente o diâmetro da marca flutuante é de 40 μm , o que permite um bom posicionamento em cima do ponto sobre o qual se está fazendo a análise.

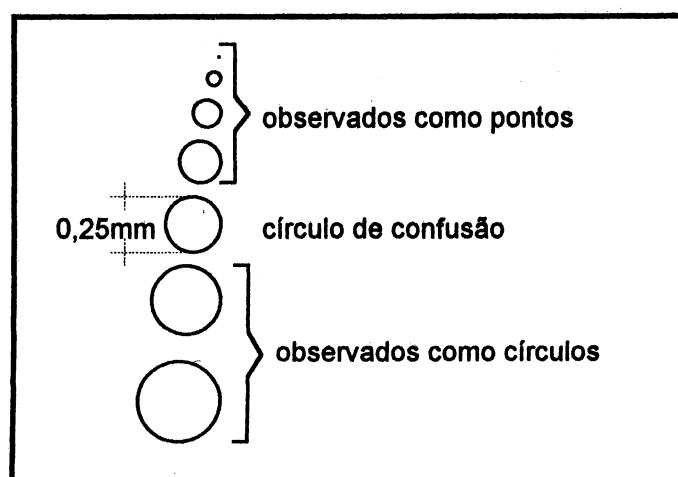


fig. 2.4

2.3.2 A PROFUNDIDADE DE FOCO

Em concordância com Paul WOLF (1974, p. 38) e Arthur HARDY e Fred PERIN (1934, p. 79), profundidade de foco é uma região, nas proximidades do plano focal⁸, onde é possível se obter a projeção de imagem nítida. Na fig. 2.5, O corresponde a um ponto objeto, S ao sistema óptico e L à região que caracteriza a profundidade de foco.

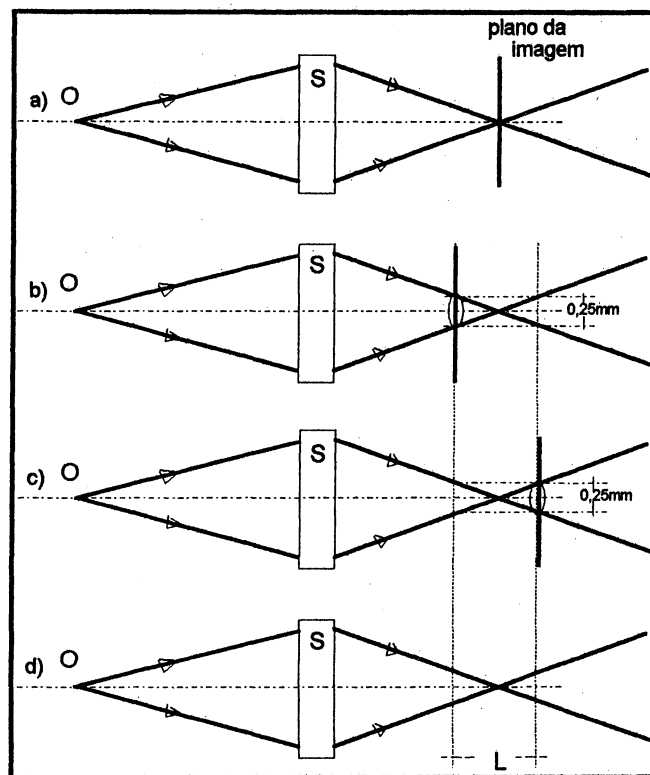


fig. 2.5

Ao se posicionar adequadamente, um objeto puntual, o sistema óptico projetará a imagem real em um anteparo. Existe uma única posição onde é satisfeita a equação 2.10 e que nesta posição têm-se o lugar ideal para a projeção, com a formação de imagem puntual (fig. 2.5.a).

Deslocando-se o anteparo, aproximando-o do sistema óptico, a imagem projetada não é mais puntual, formando um pequeno círculo. Caso o diâmetro deste círculo seja menor que o do círculo de confusão, a sensação visual é de que se observa um ponto e, no caso contrário uma imagem borrada ou seja, com pouca nitidez (fig. 2.5.b).

Tal análise pode ser feita também afastando o anteparo onde se projeta a imagem, (fig. 2.5.c). A profundidade de foco é a distância L entre as posições que o anteparo

⁸Plano normal ao eixo principal e que contém o foco.

pode assumir de maneira que nele se tenha o limiar de nitidez, antes e após a posição ideal de projeção da imagem (fig. 2.5.d).

2.3.3 FATORES DE INFLUÊNCIA

De acordo com FOTOGRAFIA (1976, p. 56), a distância focal do sistema óptico, a distância do objeto até o sistema e a abertura do diafragma são os fatores que influenciam a profundidade de foco.

A análise desta dependência é feita para uma lente delgada, porém é válida para qualquer sistema óptico.

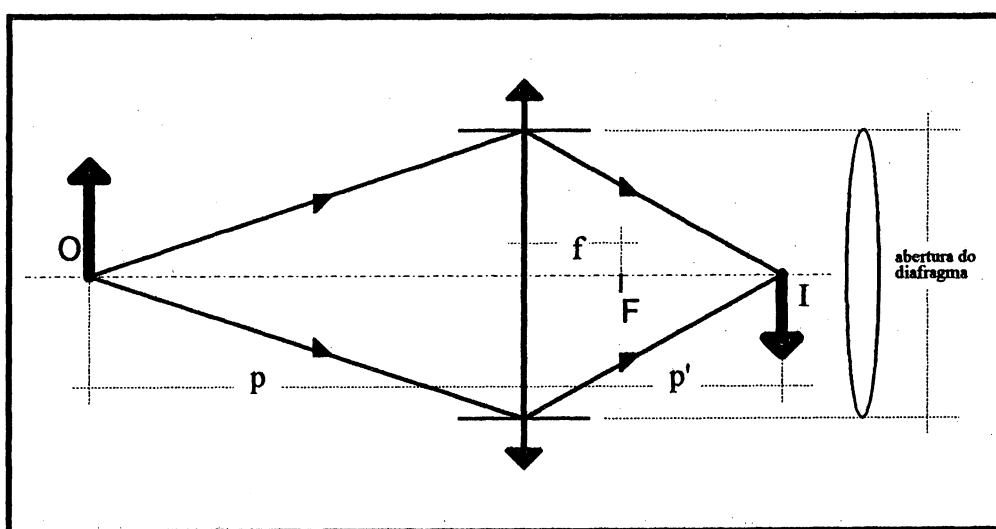


fig. 2.6

A fig. 2.6 mostra uma situação onde um objeto pontual O, possui a sua imagem I projetada em um anteparo que está posicionado na posição ideal.

A Lei dos focos conjugados é dada, de acordo com R. W. DITCHBURN (1976, p. 242), é :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad (2.10)$$

onde f é a distância focal da lente, p a distância do objeto à lente e p' a distância da lente à imagem.

Da equação 2.10 é possível explicitar a distância da imagem até a lente:

$$p' = \frac{p \cdot f}{p - f} \quad (2.11)$$

Considerando que o diâmetro do círculo de confusão (fig. 2.7) seja d , o diâmetro efetivo da lente em função da sua abertura D , e a profundidade de foco seja L , por semelhança de triângulos, tem-se ;

$$\frac{L}{2} = \frac{p'}{D}$$

cuja profundidade de foco L pode ser explicitada:

$$L = \frac{2 \cdot p' \cdot d}{D} \quad (2.12)$$

Substituindo p' , da eq. 2.11, na equação acima, resulta:

$$L = \frac{f}{D} \cdot \frac{2 \cdot d \cdot p}{(p - f)} \quad (2.13)$$

A eq. 2.13 também pode ser expressa em função da abertura do diafragma, dada pela eq. 2.5 :

$$n_r = \frac{f}{D}$$

resultando,

$$L = \frac{2 \cdot n_r \cdot d \cdot p}{p - f} \quad (2.14)$$

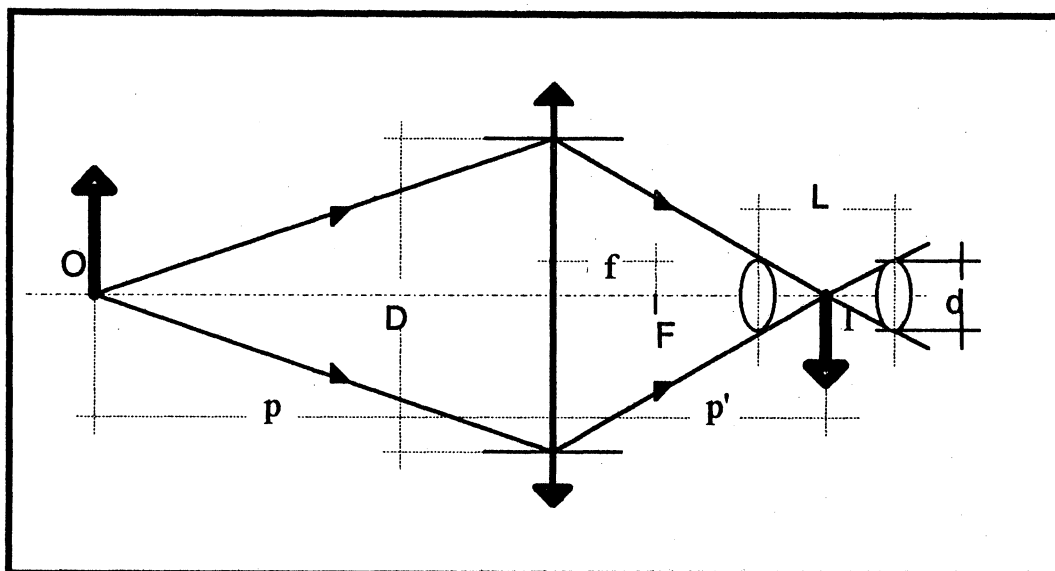


fig. 2.7

2.4 - MATRIZES DO SISTEMA ÓPTICO

2.4.1 AS MATRIZES DE APLICAÇÃO

As matrizes que estão associadas aos fenômenos ópticos da refração e da transmissão do raio luminoso em um meio de propagação, que são aquelas que constituem a matriz do sistema óptico, são descritas por Robert EISBERG e Lawrence LERNER (1981, p. 1404) e por Eugene HECHT (1987, p. 216) onde, quando um raio luminoso atravessa um sistema óptico ele estará sujeito ora ao fenômeno óptico da transmissão, ora ao fenômeno óptico da refração. Para caracterizar cada um desses fenômenos, a medida que eles ocorrerem, faz-se uso de matrizes, as quais serão descritas a seguir.

2.4.2 MATRIZ DE TRANSMISSÃO

A matriz de transmissão é aquela que caracteriza a passagem do raio luminoso por um meio homogêneo.

Na fig. 2.8 têm-se que x é a espessura do meio de propagação. A cota do raio luminoso, em relação ao eixo óptico, ao penetrar no meio é dada por y e ao atingir o último dióptro do meio, y' . A direção do raio luminoso ao entrar e no momento que atinge o último dióptro é dada por θ e por θ' , respectivamente.

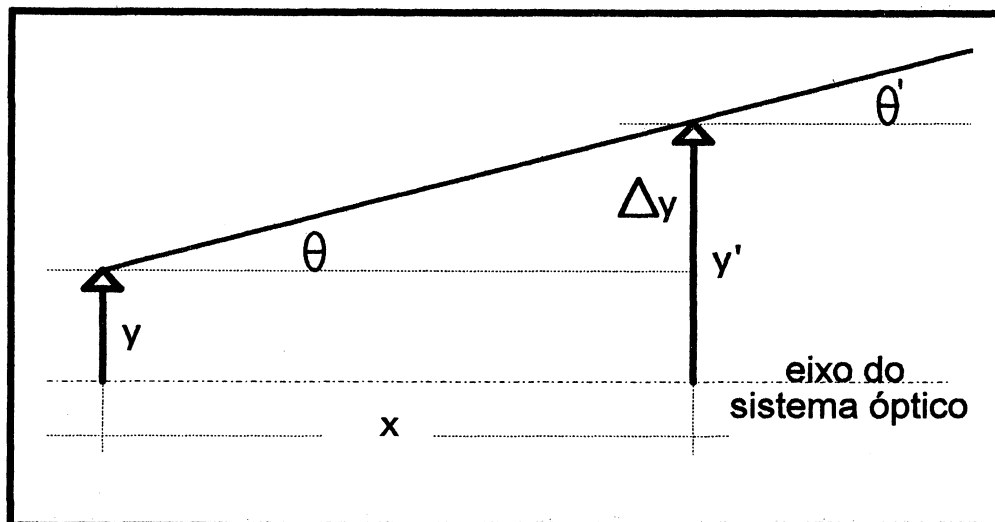


fig. 2.8

A cota y' , com que o raio luminoso sai do meio de propagação, difere da cota de entrada y de um valor Δy (fig. 2.8), resultando:

$$y + \Delta y = y' \quad (2.15)$$

sendo a extensão Δy dada por

$$\Delta y = x \cdot \text{tg} \theta \quad (2.16)$$

Para situações em que θ é pequeno, o ângulo confunde-se com a sua tangente e, têm-se,

$$\theta \cong \text{tg} \theta, \text{ logo;}$$

$$\Delta y = x \cdot \theta. \quad (2.17)$$

Com a substituição de Δy da eq. 2.17 na eq. 2.15, têm-se que;

$$y + x \cdot \theta = y' \quad (2.18)$$

A fig. 2.8 mostra que :

$$\theta = \theta' \quad (2.19)$$

Com as equações 2.18 e 2.19, pode-se montar o sistema,

$$\begin{cases} y + x \cdot \theta = y' \\ \theta = \theta' \end{cases} \quad (2.20)$$

ou na forma matricial

$$\begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y' \\ \theta' \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

A primeira matriz acima, é definida como sendo a Matriz de Transmissão do meio de propagação de espessura x , e será designada por T .

$$T = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Define-se a matriz M como sendo a matriz objeto, pois a mesma é portadora das características do raio luminoso que parte do objeto:

$$M = \begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Analogamente é definida a matriz M' , da imagem, pois a mesma fornece as informações do raio luminoso que vêm a formar a imagem⁹:

$$M' = \begin{bmatrix} y' \\ \theta' \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

2.4.3 MATRIZ DE REFRAÇÃO

Quando um raio luminoso muda de meio de propagação, o fenômeno óptico que ocorre é chamado de refração. Para caracterizar tal comportamento, à ele é associado uma matriz, a qual é denominada de matriz de refração.

⁹ É importante citar que cada objeto possui infinitas matrizes objeto, uma para cada um dos raios luminosos que partem do objeto. Na técnica *ray tracing* escolhe-se convenientemente cada raio que se deseja rastrear.

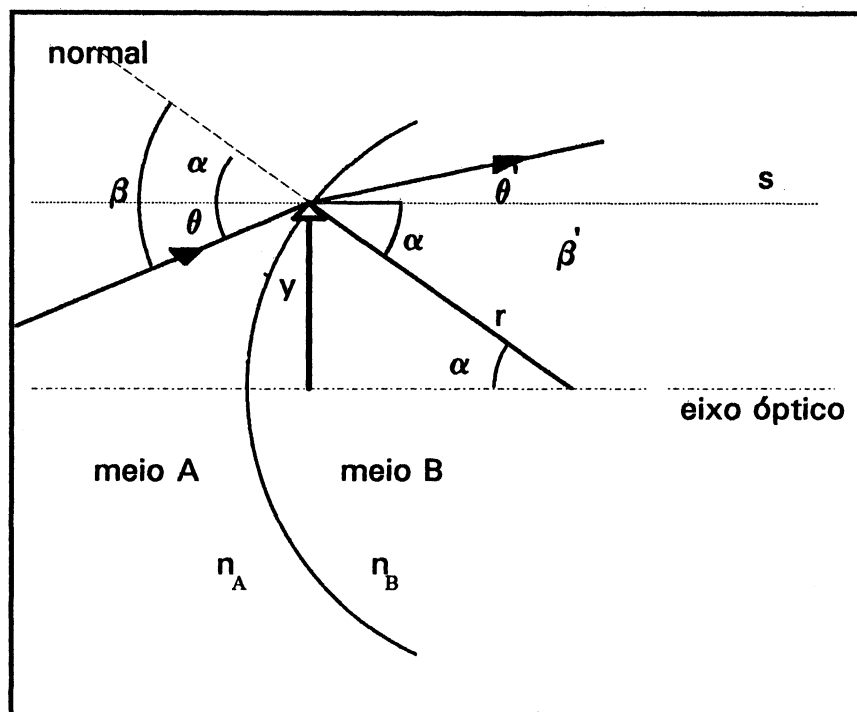


fig.2.9

Segundo Robert EISBERG e Lawrence LERNER (1981, p. 1405), têm-se um raio luminoso que se propaga da esquerda para a direita, vindo do meio A, com índice de refração n_A , para o meio B, cujo índice de refração é n_B . O dióptro, neste caso é esférico e com raio de curvatura r . A normal é a própria reta suporte do raio r e s é uma reta auxiliar paralela ao eixo do sistema óptico.

No ponto em que o raio luminoso atinge a superfície de separação dos dois meios, têm-se que a cota do raio incidente é igual a cota do raio emergente, logo;

$$y = y' . \quad (2.25)$$

Da fig. 2.9, tira-se que;

$$\beta = \alpha + \theta \quad \text{e,} \quad (2.26)$$

$$\beta' = \alpha + \theta' \quad (2.27)$$

A aplicação da lei de Snell à esta situação fornece a equação;

$$n_A \cdot \text{sen } \beta = n_B \cdot \text{sen } \beta' \quad (2.28)$$

O projeto de sistemas ópticos prevê situações que estejam dentro de certos limites de tolerância, visando minimizar o efeito de distorções e, de acordo com Max BORN e Emil WOLF (1964, p. 167), pode-se aplicar a *sine condition*¹⁰, onde para ângulos de pequena amplitude e raios próximos ao eixo óptico principal e com pouca inclinação em relação ao mesmo, é válido confundir o seno do ângulo com o próprio ângulo;

$$\text{sen } \beta = \beta ; \quad (2.29)$$

$$\text{sen } \beta' = \beta' ; \quad (2.30)$$

então, a eq. 2.28 transforma-se em;

$$n_A \cdot \beta = n_B \cdot \beta' . \quad (2.31)$$

Substituindo as equações 2.26 e 2.27 na eq. 2.31, resulta;

$$n_A \cdot (\alpha + \theta) = n_B \cdot (\alpha + \theta') . \quad (2.32)$$

O ângulo α é a razão entre o arco e o raio da superfície refratora. Segundo Manoel Jairo BEZERRA (1965, p. 189), em concordância com a *sine condition*, anteriormente citada, para arcos de pequena abertura, é válida a relação;

$$\alpha = \frac{y}{r} , \quad (2.33)$$

que substituída na eq. 2.32;

$$n_A \cdot \left(\frac{y}{r} + \theta \right) = n_B \cdot \left(\frac{y'}{r} + \theta' \right) . \quad (2.34)$$

A eq. 2.34 pode ser escrita da forma;

$$(n_A - n_B) \frac{y}{r} + n_A \cdot \theta = n_B \cdot \theta'$$

¹⁰ A *sine condition* foi descrita por R. Clausius em 1864 e por H. Helmholtz a partir de considerações termodinâmicas. A sua importância não foi reconhecida até que foi redescoberta em 1879 por E. Abbe.

Onde, explicitando-se θ' , resulta:

$$\left(\frac{n_A}{n_B} - 1\right) \frac{1}{r} y + \frac{n_A}{n_B} \theta = \theta' . \quad (2.35)$$

As equações 2.25 e 2.35 são as de maior interesse para a determinação da matriz de refração e, com elas pode-se montar o seguinte sistema;

$$\begin{cases} \left(\frac{n_A}{n_B} - 1\right) \frac{1}{r} y + \frac{n_A}{n_B} \theta = \theta' \\ y = y' \end{cases} , \quad (2.36)$$

que corresponde à equação matricial;

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \left(\frac{n_A}{n_B} - 1\right) \frac{1}{r} & \frac{n_A}{n_B} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y' \\ \theta' \end{bmatrix} . \quad (2.37)$$

Da eq. 2.37, a matriz da refração é,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \left(\frac{n_A}{n_B} - 1\right) \frac{1}{r} & \frac{n_A}{n_B} \end{bmatrix} . \quad (2.38)$$

2.5 APLICAÇÃO DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO

2.5.1 SISTEMA DE UMA ÚNICA LENTE

Quando um raio luminoso atravessa um sistema óptico qualquer ele sofre refrações e transmissões sucessivas e intercaladas. Pode-se rastrear o raio luminoso pela aplicação das matrizes de transmissão e refração. Tomando por exemplo o sistema óptico da fig. 2.10, de uma objetiva simples.

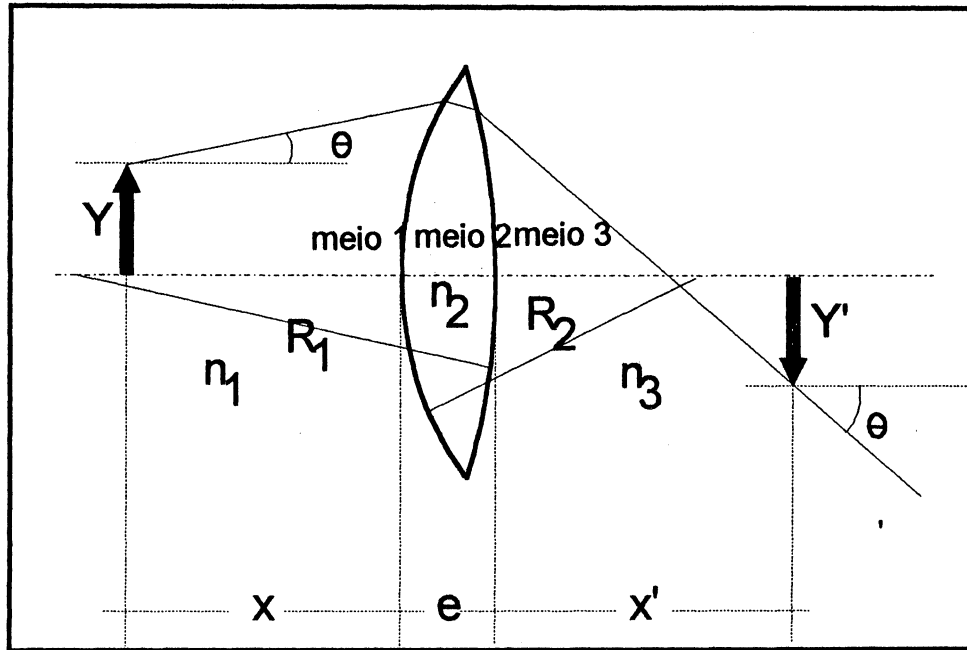


fig. 2.10

Inicialmente dispõe-se de um raio luminoso que parte de uma cota Y , segundo um ângulo θ . Este raio transmite-se no meio 1, cujo índice de refração absoluto é n_1 . Sabe-se que o ponto de chegada, para a formação final da imagem, é o ponto de cota Y' e direção θ' , no meio de propagação 3.

A matriz portadora das informações do raio luminoso que parte do objeto é dada pela eq. 2.23, a saber;

$$M = \begin{bmatrix} Y \\ \theta \end{bmatrix}.$$

Ao partir do objeto, o raio luminoso, transmite-se no meio de propagação 1. Para caracterizar esta transmissão, pré-multiplica-se a matriz M do objeto, pela matriz de transmissão do meio 1, a qual é expressa pela eq. 2.22;

$$T_1 \cdot M = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Ao atingir a superfície de separação dos meios 1 e 2, o raio luminoso sofre refração. Esta refração fica caracterizada pela pré-multiplicação da matriz de refração R_{12} , pela equação 2.39,

$$\mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_1}(\frac{n_1}{n_2} - 1) & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

A transmissão da luz no interior da lente de espessura e é dada por:

$$\mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_1}(\frac{n_1}{n_2} - 1) & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Quando da ocorrência de uma nova refração, desta vez entre os meios **2** e **3** tem-se:

$$\mathbf{R}_{23} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_2}(\frac{n_2}{n_3} - 1) & \frac{n_2}{n_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_1}(\frac{n_1}{n_2} - 1) & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Finalmente, há a propagação da luz até o ponto onde se forma a imagem, cujo meio de propagação tem a espessura x' , então

$$\mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_{23} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & x' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_2}(\frac{n_2}{n_3} - 1) & \frac{n_2}{n_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_1}(\frac{n_1}{n_2} - 1) & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Uma análise do problema nos fornece a informação de que os sucessivos produtos matriciais levam à imagem, a qual é denominada pela matriz \mathbf{M}' ;

$$\mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_{23} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{M} = \mathbf{M}' \quad (2.44)$$

A matriz \mathbf{M}' também pode ser expressa da seguinte forma, de acordo com a eq. 2.24

$$\mathbf{M}' = \begin{bmatrix} Y' \\ \theta' \end{bmatrix} .$$

2.5.2 SISTEMA COM VÁRIAS LENTES

A aplicação das matrizes de refração e de transmissão, à matriz do objeto, visando obter a matriz da imagem, semelhantemente ao caso anterior, onde se tinha um sistema

constituído por apenas uma lente, pode ser aplicado para sistemas com duas ou mais lentes. Com o intuito de mostrar a simplicidade de análise de sistemas ópticos por meio de matrizes, será feita a aplicação para um sistema com duas lentes e depois generalizado para um sistema com várias lentes.

2.5.2.1 SISTEMA COM DUAS LENTES

Ná prática, o elemento de maior interesse é, justamente, a última expressão matricial escrita. Nesta aplicação supõe-se um sistema constituído por duas lentes. Um cálculo prévio seria necessário para a determinação dos elementos das matrizes constituintes do sistema. No entanto, neste ítem, limitar-se-á apenas em mostrar a seqüência correta dos produtos matriciais.

Para ilustrar esta seqüência, será considerada a fig. 2.11, onde 1, 2, 3 e 4 são os meios de propagação, Y representa o objeto, Y' a imagem, θ a direção do raio luminoso que parte do objeto e θ' a da imagem. Têm-se ainda que x é a distância do objeto até a lente e x' a distância da imagem até a lente.

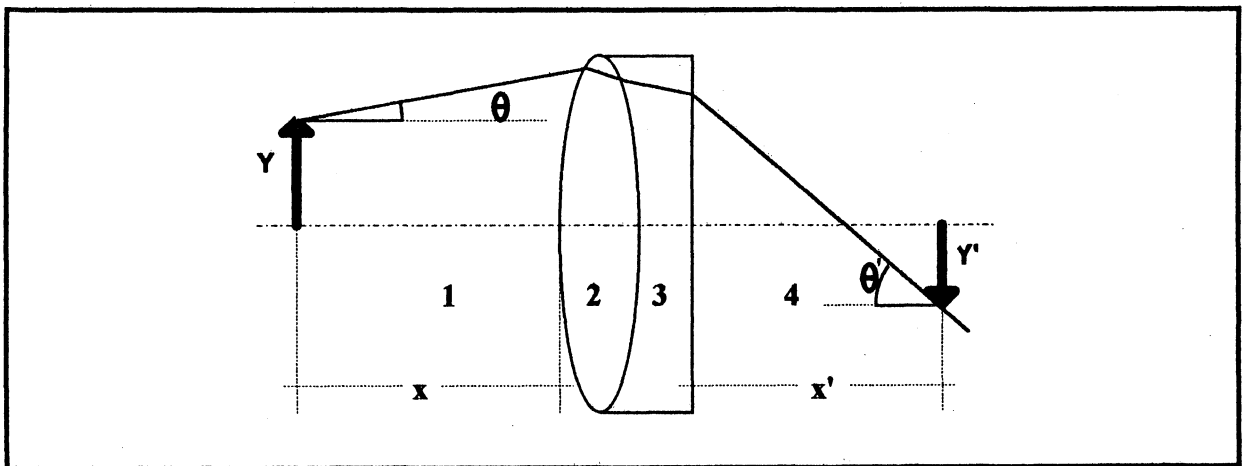


fig. 2.11

Inicialmente toma-se a matriz M do objeto, e aplica-se a matriz de transmissão do meio 1 e, em seguida a matriz de refração de 1 para 2. Depois a matriz de transmissão em 2, a de refração de 2 para 3, e assim sucessivamente até a última matriz do transmissão do meio 4, compondo desta forma a matriz da imagem M';

$$T_4 \cdot R_{34} \cdot T_3 \cdot R_{23} \cdot T_2 \cdot R_{12} \cdot T_1 \cdot M = M' \quad (2.45)$$

Para um sistema constituído por várias lentes (fig. 2.12), a expressão 2.45 é generalizada da seguinte maneira:

$$T_n \cdot R_{n-1,n} \cdot \dots \cdot T_5 \cdot R_{45} \cdot T_4 \cdot R_{34} \cdot T_3 \cdot R_{23} \cdot T_2 \cdot R_{12} \cdot T_1 \cdot M = M' \quad (2.46)$$

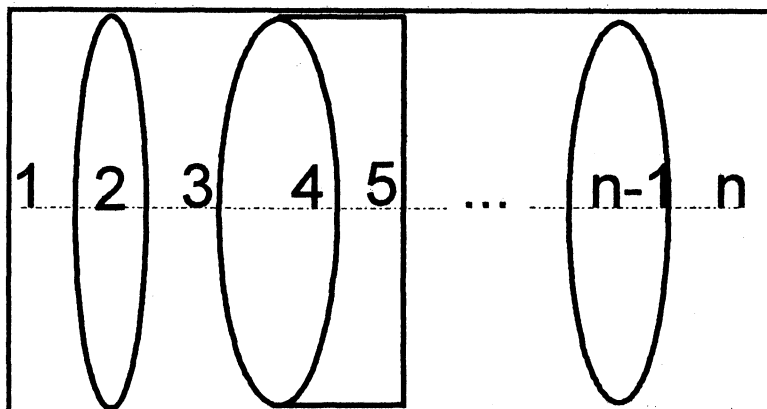


fig. 2.12

Sendo este, o caso mais comum a ser aplicado na determinação da matriz do sistema óptico.

2.6 MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO

A expressão matricial entre as matrizes de transmissão mais extremas, carregam informações somente do sistema óptico, e segundo Robert EISBERG e Lawrence LERNER(1981, p. 1412) por isso são chamadas de "matrizes do sistema óptico". Nos casos descritos anteriormente elas seriam expressas por:

I - Lente simples

$$S_1 = R_{23} \cdot T_2 \cdot R_{12} \quad . \quad (2.47)$$

II - Sistema de duas lentes

$$S_2 = R_{34} \cdot T_3 \cdot R_{23} \cdot T_2 \cdot R_{12} \quad . \quad (2.48)$$

III - Sistema de várias lentes

$$S_3 = R_{78} \cdot T_7 \cdot R_{67} \cdot T_6 \cdot R_{56} \cdot T_5 \cdot R_{45} \cdot T_4 \cdot R_{34} \cdot T_3 \cdot R_{23} \cdot T_2 \cdot R_{12} \quad . \quad (2.49)$$

Para os três casos descritos acima, as equações matriciais poderiam ter sido escritas da forma;

$$\mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{M} = \mathbf{M}' ,$$

$$\mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{M} = \mathbf{M}' ,$$

$$\mathbf{T}_8 \cdot \mathbf{S}_3 \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{M} = \mathbf{M}' , \text{ respectivamente.}$$

As matrizes dos sistemas ópticos sempre serão da forma :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} & \mathbf{b} \\ \mathbf{c} & \mathbf{d} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Em um sistema genérico, a aplicação das matrizes é:

$$\begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} & \mathbf{b} \\ \mathbf{c} & \mathbf{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}' \\ \theta' \end{bmatrix} , \text{ logo} \quad (2.51)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a} + \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_n & \mathbf{b} + \mathbf{d} \cdot \mathbf{x}_n \\ \mathbf{c} & \mathbf{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y} + \theta \cdot \mathbf{x}_1 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}' \\ \theta' \end{bmatrix} , \text{ ou}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a} \cdot \mathbf{y} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_1 \cdot \theta + \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_n \cdot \mathbf{y} + \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_n \cdot \mathbf{x}_1 \cdot \theta + \mathbf{b} \cdot \theta + \mathbf{d} \cdot \mathbf{x}_n \cdot \theta \\ \mathbf{c} \cdot \mathbf{y} + \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_1 \cdot \theta + \mathbf{d} \cdot \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}' \\ \theta' \end{bmatrix} . \quad (2.52)$$

Devido à igualdade entre as matrizes e após as devidas evidenciações, chega-se à expressão:

$$(\mathbf{a} + \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_n) \cdot \mathbf{y} + (\mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{x}_n + \mathbf{b} + \mathbf{d} \cdot \mathbf{x}_n) \cdot \theta = \mathbf{y}' \quad (2.53)$$

A eq. 2.53 informa que, dos infinitos raios luminosos que partem da extremidade do objeto, com cota y , que atingem o sistema óptico, todos chegam na extremidade da imagem.

Esta possui cota y' , isto é, independem da direção dos raios luminosos que partem do objeto, dada por θ , logo o coeficiente de θ deve ser nulo, então:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{x}_n + \mathbf{b} + \mathbf{d} \cdot \mathbf{x}_n = 0 ; \quad (2.54)$$

onde, após explicitar x_n ,

$$\mathbf{x}_n = -\frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{b}}{\mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{d}} \quad (2.55)$$

Os elementos da eq. 2.55, são:

x_n é a distância da lente até a imagem;

x_1 é a distância do objeto até a lente;

$a, b, c,$ e d são os elementos da matriz do sistema.

Observa-se a simplicidade dos cálculos com sistemas ópticos complexos, pois basta conhecer a matriz do sistema e a distância do objeto até o sistema, que é possível determinar a posição da imagem.

Outro elemento de fundamental importância é obtido a partir da eq. 2.53, sem o termo em θ , por ser o seu coeficiente nulo:

$$(\mathbf{a} + \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_n) \cdot \mathbf{y} = \mathbf{y}' , \text{ ou} \quad (2.56)$$

$$\mathbf{a} + \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_n = \frac{\mathbf{y}'}{\mathbf{y}} \quad (2.57)$$

A eq. 2.57 fornece a razão entre a cota do objeto e a cota da imagem, que é a ampliação ou aumento linear transversal.

De acordo com MANUAL OF PHOTOGRAMMETRY (1980, p. 109) o aumento linear transversal também é denominado de ampliação lateral e vem a caracterizar, segundo Wilfred BAKER (1960, p. 23), a escala da fotografia.

2.7 - DETERMINANTE DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO

A principal característica da matriz de um sistema óptico, é que o seu determinante tem valor igual a 1 (um). Para demonstrar isto, far-se-á uso da seguinte propriedade relativa ao produto de matrizes;

"O determinante de um produto de matrizes é igual ao produto dos determinantes dessas matrizes".

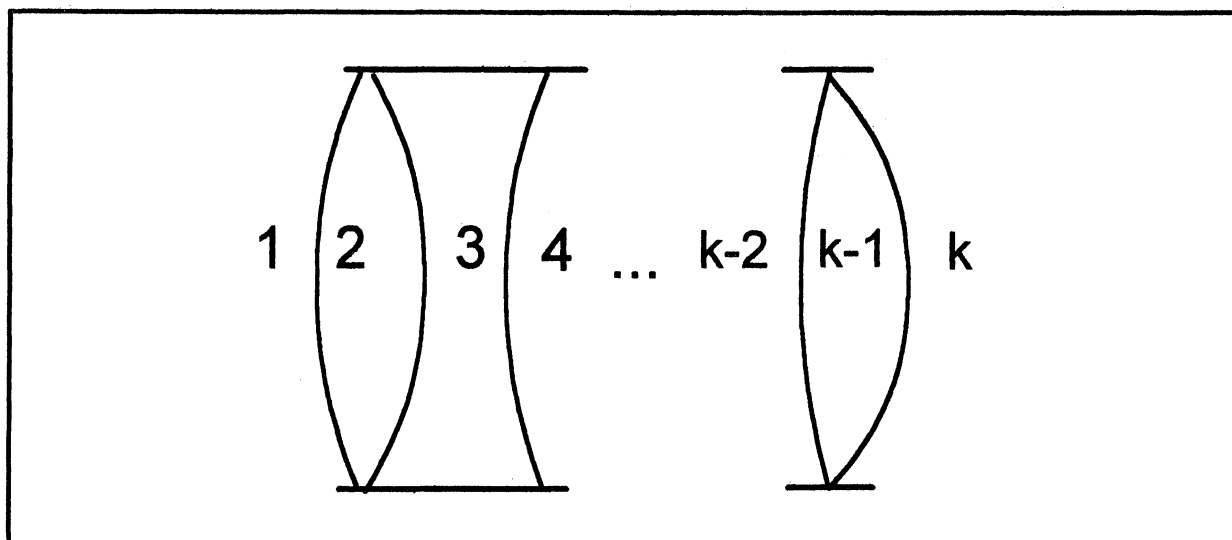


fig. 2.13

O sistema óptico apresentado na figura 2.13 é constituído por uma quantidade de lentes e espaços entre as mesmas, tal que, o número total de meios de propagação é dado por k .

A espessura do meio de propagação 2 é x_2 , do meio 3, x_3 , e assim por diante, até o meio $k-1$, onde esta espessura é x_{k-1} . Não se tem interesse nas espessuras dos meios 1 e k , por estarem os mesmos fora do sistema óptico, portanto eles não interferem na matriz desse sistema.

O primeiro fenômeno óptico que ocorre é a refração do meio 1 para o meio 2. Tal refração caracteriza-se pela matriz:

$$\mathbf{R}_{1,2} .$$

Em seguida ocorre transmissão no meio 2;

$$\mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{1,2};$$

na sequência, ter-se á a refração de 2 para 3

$$\mathbf{R}_{2,3} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{1,2};$$

transmissão no meio 3

$$\mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_{2,3} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{1,2};$$

refração de 3 para 4

$$\mathbf{R}_{3,4} \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_{2,3} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{1,2} ;$$

transmissão em 4

$$\mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{R}_{3,4} \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_{2,3} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{1,2} ;$$

Após sucessivas transmissões e refrações, chega-se ao meio k-2, onde a aplicação da matriz de transmissão leva à:

$$\mathbf{T}_{k-2} \dots \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{R}_{3,4} \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_{2,3} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{1,2} ;$$

agora ocorre a refração do meio k-2 para o meio k-1

$$\mathbf{R}_{k-2,k-1} \cdot \mathbf{T}_{k-2} \dots \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{R}_{3,4} \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_{2,3} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{1,2} ;$$

transmissão no meio k-1

$$\mathbf{T}_{k-1} \cdot \mathbf{R}_{k-2,k-1} \cdot \mathbf{T}_{k-2} \dots \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{R}_{3,4} \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_{2,3} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{1,2} \quad \text{e,}$$

finalmente a refração de k-1 para k, caracterizando a matriz do sistema óptico S

$$\mathbf{S} = \mathbf{R}_{k-1,k} \cdot \mathbf{T}_{k-1} \cdot \mathbf{R}_{k-2,k-1} \cdot \mathbf{T}_{k-2} \dots \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{R}_{3,4} \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_{2,3} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_{1,2} . \quad (2.58)$$

O desenvolvimento dessas matrizes fornece a expressão;

$$\begin{aligned}
S = & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{r_{k-1}} \left(\frac{n_{k-1}}{n_k} - 1 \right) & \frac{n_{k-1}}{n_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_{k-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{r_{k-2}} \left(\frac{n_{k-2}}{n_{k-1}} - 1 \right) & \frac{n_{k-2}}{n_{k-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_{k-2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \\
& \dots \begin{bmatrix} 1 & x_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{r_3} \left(\frac{n_3}{n_4} - 1 \right) & \frac{n_3}{n_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{r_2} \left(\frac{n_2}{n_3} - 1 \right) & \frac{n_2}{n_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{r_1} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} .
\end{aligned} \tag{2.59}$$

Para o cálculo do determinante da matriz S, multiplica-se cada um dos determinantes das matrizes que constituem S;

$$\Delta_S = \Delta_{R_{k-1,k}} \cdot \Delta_{T_{k-1}} \cdot \Delta_{R_{k-2,k-1}} \cdot \Delta_{T_{k-2}} \dots \Delta_{T_4} \cdot \Delta_{R_{3,4}} \cdot \Delta_{T_3} \cdot \Delta_{R_{2,3}} \cdot \Delta_{T_2} \cdot \Delta_{R_{1,2}} .$$

Todas as matrizes de transmissão possuem determinante unitário,

$$\Delta_T = \begin{vmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 . \tag{2.60}$$

As matrizes de refração possuem determinante igual ao índice de refração relativo entre os meios;

$$\Delta_R = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{r} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) & \frac{n_1}{n_2} \end{vmatrix} = \frac{n_1}{n_2} , \tag{2.61}$$

logo,

$$\Delta_S = \Delta_{R_{k-1,k}} \cdot \Delta_{R_{k-2,k-1}} \cdot \Delta_{T_{k-2}} \dots \Delta_{R_{3,4}} \cdot \Delta_{R_{2,3}} \cdot \Delta_{R_{1,2}} ,$$

ou

$$\Delta_S = \frac{n_{k-1}}{n_k} \cdot \frac{n_{k-2}}{n_{k-1}} \dots \frac{n_3}{n_4} \cdot \frac{n_2}{n_3} \cdot \frac{n_1}{n_2} .$$

Após as devidas simplificações, chega-se a

$$\Delta_S = \frac{n_1}{n_k} , \quad (2.62)$$

mas como o meio 1 é o mesmo meio k, pois ambos constituem o meio exterior à lente, os seus índices são iguais, então;

$$n_1 = n_k ,$$

ou seja,

$$\Delta_S = 1 . \quad (2.63)$$

Esta propriedade é de suma importância para este trabalho, pois uma das avaliações a ser feita, e que freqüentemente será efetuada, é a análise do valor do determinante da matriz do sistema óptico.

CAPÍTULO 3

PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

O propósito principal deste trabalho é o desenvolvimento de um método fotogramétrico para a determinação da matriz do sistema óptico da objetiva de uma máquina fotográfica.

Inicialmente é feita a simulação de um sistema óptico com o fornecimento dos seus elementos geométricos e físicos e a sua matriz é calculada matematicamente.

Propõe-se um campo de provas constituído por 4 pontos materializados no espaço objeto. A partir desses pontos, aplica-se a matriz do sistema óptico, já calculada matematicamente e determina-se os correspondentes homólogos no espaço imagem.

Na etapa seguinte, ignorando-se o conhecimento da matriz do sistema óptico, com os pontos do espaço objeto e os do espaço imagem obtidos anteriormente, aplica-se o método fotogramétrico para a determinação da matriz do sistema óptico.

Conhecidos os elementos da matriz do sistema óptico, pelos dois métodos, têm-se condições de comparar o resultado obtido matematicamente com o resultado obtido através do método fotogramétrico. A avaliação desta correspondência é feita pela aplicação do teste estatístico de qui-quadrado (χ^2), que segundo Frederick C. MILLS (1995, p.512) e Paul R. LOHNES e William W. COOLEY (1968, p.144) é o que se adequa à esta situação.

3.1 - FLUXOGRAMA DAS OPERAÇÕES

Vários programas computacionais, em linguagem FORTRAN, são utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Visando organizar a seqüência das suas aplicações, têm-se o fluxograma dado pela fig. 3.1.

Este fluxograma descreve a seqüência dos programas computacionais, os arquivos de dados de entrada e os arquivos de saída, com a devida orientação a respeito dos arquivos que serão gerados por alguns dos programas, para servirem de entrada para outros.

Em seguida à fig. 3.1, têm-se a tabela 3.1, com a descrição da função de cada um dos programas computacionais que são utilizados e seus arquivos de entrada e saída de dados.

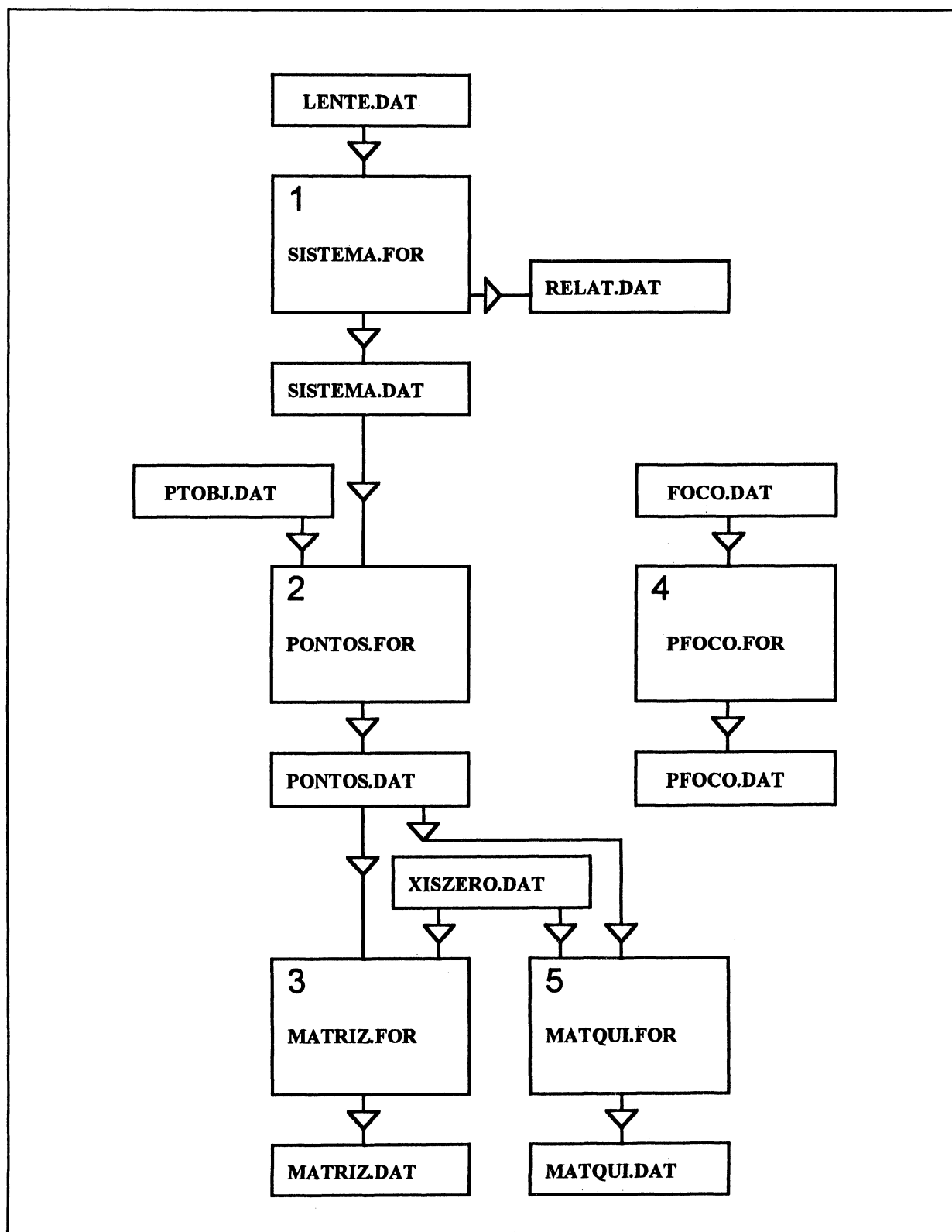


fig. 3.1

TABELA 3.1 - DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Nº	PROGRAMA	FUNÇÃO	ENTRADA	SAÍDA
1	SISTEMA.FOR (Anexo 1)	Determina a matriz de um sistema ótico simulado	LENTE.DAT	SISTEMA.DAT RELAT.DAT
2	PONTOS.FOR (Anexo 2)	Simula pontos no espaço objeto e no espaço imagem	SISTEMA.DAT PTOBJ.DAT	PONTOS.DAT
3	MATRIZ.FOR (Anexo 3)	Determina a matriz do sistema óptico a partir dos pontos do espaço objeto e do espaço imagem e aplica o teste de χ^2 .	PONTOS.DAT XISZERO.DAT	MATRIZ.DAT
4	PFOCO.FOR (Anexo 4)	Calcula a profundidade de foco para uma dada situação	FOCO.DAT	PFOCO.DAT
5	MATQUI.FOR (Anexo 5)	Introduz o erro desejado nas observações, determinana a matriz do sistema óptico, aplica o teste de χ^2 , introduz novo erro, calcula a nova matriz e assim sucessivamente, até que o valor de χ^2 seja maior que um valor desejado.	PONTOS.DAT XISZERO.DAT	MATQUI.DAT

3.2 - SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ÓPTICO

A análise do comportamento de um sistema óptico pode ser feita por meio da sua matriz, a qual substitui todo um tratamento geométrico que exige a aplicação das leis clássicas da óptica geométrica que são aplicadas a cada uma das lentes que constituem o sistema óptico. Quando um sistema óptico, tal qual a objetiva de uma câmera métrica, é analisado, devido a sua grande quantidade de lentes, o tratamento geométrico torna-se exaustivo e com grande complexidade, porém, quando ele é feito pela matriz do sistema óptico, o grau de complexidade independe da quantidade de lentes do sistema. Por este motivo, a simulação que ora é feita, baseia-se em um sistema óptico composto por uma só lente.

A determinação da matriz do sistema óptico depende do conhecimento dos seguintes elementos;

- índice de refração do meio que envolve as lentes (n_1);
- índice de refração do material de que é constituída a lente (n_2);
- raio de curvatura do primeiro dióptro (r_1);

- d) raio de curvatura do segundo dióptro (r_2);
- e) espessura da lente (e).

A matriz deste sistema óptico é dada pela eq. 2.47;

$$S = R_{23} \cdot T_2 \cdot R_{12}$$

ou,

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{r_2} \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & e_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{r_1} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

a qual é uma matriz quadrada de ordem 2 que, pela eq. 2.50 corresponde à:

$$S = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}.$$

A determinação matemática desta matriz é feita pelo programa computacional SISTEMA.FOR, com base no modelo matemático descrito acima.

3.2.1 - PROGRAMA COMPUTACIONAL SISTEMA.FOR

O programa computacional SISTEMA.FOR (anexo 1) tem a função de determinar matematicamente a matriz do sistema óptico composto por uma só lente.

A entrada dos dados é feita por meio do arquivo de dados LENTE.DAT (anexo 6). A seqüência das variáveis no arquivo de entrada corresponde, no comando de leitura dos dados do programa computacional, à seguinte:

- a) RAI01, raio de curvatura do primeiro dióptro;
- b) RAI02, raio de curvatura do segundo dióptro;
- c) ESP, espessura da lente;
- d) REFRAC, índice de refração do material de que é constituída a lente.

A saída dos dados é apresentada em dois arquivos, o RELAT.DAT, que é um relatório geral e detalhado dos dados de entrada, das matrizes intermediárias calculadas durante o

processamento e dos elementos da matriz do sistema óptico. O outro arquivo criado pelo programa SISTEMA.FOR é o SISTEMA.DAT . Neste arquivo apenas estão gravados os elementos da matriz do sistema óptico, que serão utilizados por vários outros programas, durante o desenvolvimento deste trabalho.

3.3 - PONTOS DO ESPAÇO OBJETO E IMAGEM

A matriz do sistema óptico pode ser aplicada para cada ponto do espaço objeto para a determinação do seu homólogo no espaço imagem. A definição de um ponto é feita a partir do conhecimento da sua cota y_i (afastamento em relação ao eixo do sistema óptico), da direção θ_i (ângulo com a horizontal) de um raio luminoso que por ele passa e da sua distância x_i , até o sistema óptico .

A cada ponto objeto associa-se a matriz dada pela eq.2.23 :

$$M_i = \begin{bmatrix} y_i \\ \theta_i \end{bmatrix} ;$$

e à imagem, a matriz dada pela eq. 2.24:

$$M_i = \begin{bmatrix} y_i \\ \theta_i \end{bmatrix} .$$

É importante que seja feita a observação de que a distância de cada ponto objeto até o sistema óptico x_i , influi na determinação da matriz M_i , mas não é elemento da matriz do objeto M_i .

3.3.1 - MODELO MATEMÁTICO

Com o conhecimento da matriz M , do ponto objeto, a ela se aplica a transmissão relativa ao meio entre o objeto e a lente, pela pré multiplicação da matriz de transmissão T_1 pela matriz M . A este conjunto aplica-se a matriz do sistema óptico S e finalmente, pré multiplica-se a matriz de transmissão do meio entre o sistema óptico e a imagem, T_2 , resultando na matriz M' da imagem.

$$\mathbf{M}' = \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{M} ,$$

que corresponde à aplicação da eq. 2.51;

$$\begin{bmatrix} y_i' \\ \theta_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & x_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_i \\ \theta_i \end{bmatrix} .$$

Para a determinação de cada uma das distâncias dos pontos imagem até o sistema óptico, com o uso da eq. 2.55, têm-se que:

$$x_i' = - \frac{a \cdot x_i + b}{c \cdot x_i + d} .$$

Este modelo matemático será aplicado para quatro pontos do espaço objeto, com a conseqüente determinação das cotas e direções dos quatro pontos homólogos do espaço imagem, por meio do programa computacional PONTOS.FOR.

3.3.2 - PROGRAMA COMPUTACIONAL PONTOS.FOR

O programa desenvolvido em linguagem FORTRAN, PONTOS.FOR (anexo 2), determina os pontos do espaço imagem a partir dos pontos do espaço objeto e da matriz do sistema óptico.

Os elementos da matriz **S** do sistema óptico, são lidos no arquivo de dados SISTEMA.DAT (anexo 8), na ordem **a**, **b**, **c**, e **d**, que no programa computacional correspondem às variáveis **SS(1,1)**, **SS(1,2)**, **SS(2,1)** e **SS(2,2)**, respectivamente.

Os dados relativos aos pontos do espaço objeto, são apresentados no arquivo de dados PTOBJ.DAT (anexo 9), na seguinte ordem:

- a) distância do objeto até a lente ;
- b) cota do objeto ;
- c) direção do raio luminoso do objeto .

No programa PONTOS.FOR eles correspondem às variáveis **S1**, **YY** e **TETA**, respectivamente, que são aplicadas a cada um dos quatro pontos do arquivo de dados, em cada passagem, de um laço de repetição, pelos comandos de leitura do arquivo de dados.

Após calculados, os dados dos pontos do espaço imagem, são gravados no arquivo PONTOS.DAT (anexo 10), para posterior utilização pelo programa MATRIZ.FOR (anexo 3).

O arquivo de dados PONTOS.DAT é apresentado da seguinte maneira, em correspondência com a variáveis do comando de entrada do programa MATRIZ.FOR:

- a) NNN : número de ordem de identificação do ponto;
- b) YY : cota do objeto;
- c) YYL: cota da imagem;
- d) XX: distância do ponto objeto até o sistema óptico;
- e) XXL: distância do ponto imagem até o sistema óptico .

3.4 - DETERMINAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO

Esta é a parte principal de todo o trabalho. Anteriormente foi feita a determinação de um conjunto de pontos no espaço imagem, a partir de pontos do espaço objeto, com a aplicação da matriz do sistema óptico calculada matematicamente. Com isso, passa-se a ter a simulação de um campo de provas, onde considera-se que os pontos, objeto e imagen, são dados do terreno e das fotografias. Os dados relativos a estes pontos serão considerados como observações, medidas com precisão absoluta, em função de terem sido determinados matematicamente.

Com esses pontos, aplica-se o método proposto neste trabalho utilizando-se o programa computacional MATRIZ.FOR , para determinar experimentalmente, a matriz do sistema óptico. A partir de tal determinação pode-se efetuar uma comparação com a matriz já conhecida, calculada pelo programa SISTEMA.FOR, para as devidas análises e confirmação da eficiência do método proposto.

3.4.1 - MODELO MATEMÁTICO PARA A DETERMINAÇÃO DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO

A fig. 3.2 fornece a representação de um ponto genérico do espaço objeto, o seu correspondente no espaço imagem e o sistema óptico. O ponto do espaço objeto está a uma distância y do eixo do sistema óptico e caracteriza um objeto de cota y . A distância do objeto até o sistema óptico é dada por x . Dentre os infinitos raios luminosos que partem da

extremidade do objeto, um deles o faz com direção θ . Após atravessar o sistema óptico, o raio luminoso, agora com direção θ' , passa pela extremidade da imagem.

A imagem formada dista x' do sistema óptico e possui cota y' . Neste caso a imagem está orientada para baixo, em relação ao eixo do sistema óptico, indicando que a cota estará precedida de sinal negativo, em oposição ao sinal da cota do objeto. Caso o objeto tenha cota negativa, a cota da imagem será positiva, em função de objeto e imagem serem invertidos, um em relação ao outro.

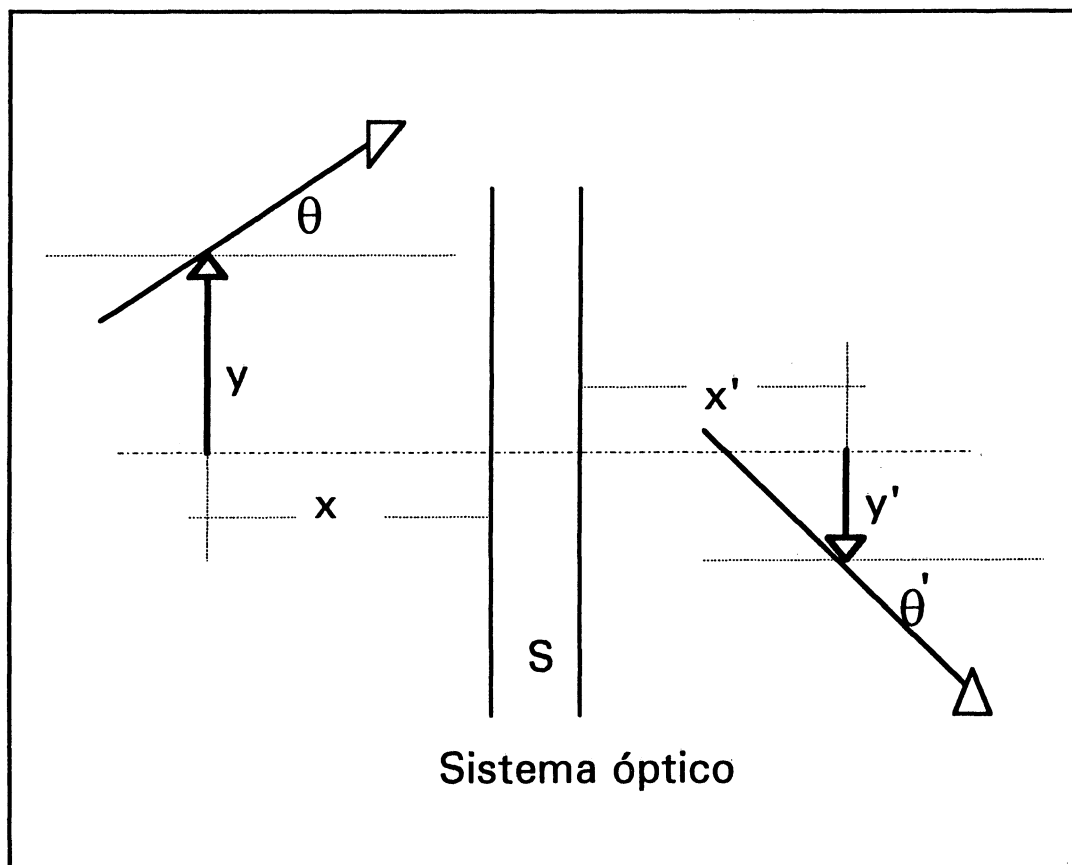


fig. 3.2

Para cada ponto em análise (objeto-imagem), somente serão considerados como observações, os elementos:

$$y_i, y_i', x_i, x_i'.$$

Um conjunto de quatro pontos fornecerá informações suficientes para o desenvolvimento do método. A fig. 3.3 mostra as observações relativas ao conjunto desses quatro pontos.

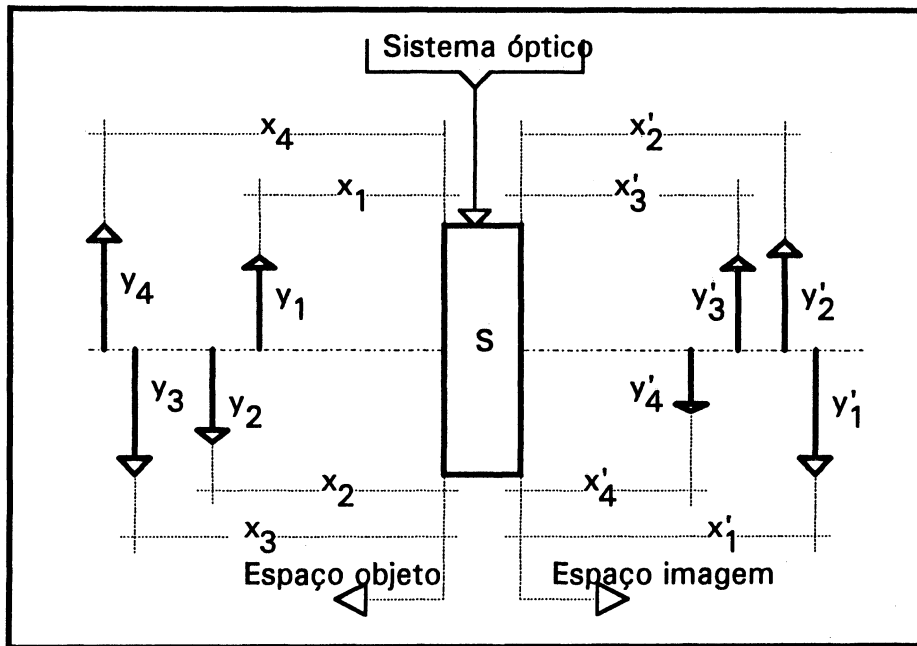


Fig. 3.3

Considerando-se que de cada ponto podem ser feitas medidas das cotas e respectivas distâncias até o sistema óptico, com essas medidas, monta-se o vetor das observações:

$$\mathbf{L}_b = [y_1 \quad y'_1 \quad x_1 \quad x'_1 \quad y_2 \quad y'_2 \quad x_2 \quad x'_2 \quad y_3 \quad y'_3 \quad x_3 \quad x'_3 \quad y_4 \quad y'_4 \quad x_4 \quad x'_4]^T \quad (3.2)$$

Os elementos da matriz do sistema óptico são considerados como parâmetros à determinar os quais são as incógnitas;

$$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \text{ e } \mathbf{d} \quad .$$

Os parâmetros também podem ser dispostos de maneira a compor uma matriz coluna, denominada de vetor dos parâmetros, o qual será representado por \mathbf{X} :

$$\mathbf{X} = [\mathbf{a} \quad \mathbf{b} \quad \mathbf{c} \quad \mathbf{d}]^T . \quad (3.3)$$

Com os parâmetros e observações relativas a um ponto monta-se o sistema de equações abaixo, através da aplicação das equações 2.54 e uma variação da eq. 2.57, e para a situação ideal em que se tenha todas as observações isentas de erros;

$$\begin{cases} \mathbf{a} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b} + \mathbf{x}' \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{x}' \cdot \mathbf{d} = 0 \\ \mathbf{a} \cdot \mathbf{y} + \mathbf{x}' \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{y} - \mathbf{y}' = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Cada ponto fornece quatro observações, e com a aplicação delas no sistema acima, montam-se duas equações. Para quatro pontos têm-se dezesseis observações e oito equações, o que possibilitará efetuar um ajustamento. O modelo matemático passa a ser então:

$$\begin{cases} \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{b} + \mathbf{x}'_1 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}'_1 \cdot \mathbf{d} = 0 \\ \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}_1 + \mathbf{x}'_1 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{y}_1 - \mathbf{y}'_1 = 0 \\ \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{b} + \mathbf{x}'_2 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{x}'_2 \cdot \mathbf{d} = 0 \\ \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}_2 + \mathbf{x}'_2 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{y}_2 - \mathbf{y}'_2 = 0 \\ \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_3 + \mathbf{b} + \mathbf{x}'_3 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_3 + \mathbf{x}'_3 \cdot \mathbf{d} = 0 \\ \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}_3 + \mathbf{x}'_3 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{y}_3 - \mathbf{y}'_3 = 0 \\ \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_4 + \mathbf{b} + \mathbf{x}'_4 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_4 + \mathbf{x}'_4 \cdot \mathbf{d} = 0 \\ \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}_4 + \mathbf{x}'_4 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{y}_4 - \mathbf{y}'_4 = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Na situação ideal, a condição acima só estará satisfeita se tanto os parâmetros quanto as observações estiverem ajustadas. Para tanto, será aplicado o **Método Combinado** de ajustamento, com iterações (modelo não linear) em virtude de, implicitamente estarem envolvidos tanto parâmetros como observações.

3.5 - MÉTODO COMBINADO DE AJUSTAMENTO

Ajustamento é um procedimento que deve ser adotado por todo aquele que trabalha com observações superabundantes, seja ele fotogrametrista, geodesta, cartógrafo ou mesmo físico, dentre outros. Existem vários métodos de ajustamento. A maioria deles com uso bastante explorado e que são muito usados como ferramenta de trabalho para a estimação de parâmetros de solução ótima.

Quando o modelo matemático funcional não for linear e nele estiverem implicitamente envolvidos parâmetros e observações, segundo DALMOLIN (1976) e GEMAEL (1974) , deve ser adotado o Método Combinado com iterações.

3.5.1 - MODELO MATEMÁTICO DE AJUSTAMENTO

No presente caso as observações foram simuladas e estão isentas de erros. Embora se saiba disto, as observações serão tratadas, daqui por diante, como se apresentassem as flutuações probabilísticas normais, sem os inconvenientes erros sistemáticos, visando a aplicação de ajustamento.

O sistema de equações 3.5 , pode ser interpretado como sendo da forma

$$\begin{cases} \mathbf{f}_1 = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{b} + \mathbf{x}'_1 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}'_1 \cdot \mathbf{d} \\ \mathbf{f}_2 = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}_1 + \mathbf{x}'_1 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{y}_1 - \mathbf{y}'_1 \\ \mathbf{f}_3 = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{b} + \mathbf{x}'_2 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{x}'_2 \cdot \mathbf{d} \\ \mathbf{f}_4 = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}_2 + \mathbf{x}'_2 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{y}_2 - \mathbf{y}'_2 \\ \mathbf{f}_5 = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_3 + \mathbf{b} + \mathbf{x}'_3 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_3 + \mathbf{x}'_3 \cdot \mathbf{d} \\ \mathbf{f}_6 = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}_3 + \mathbf{x}'_3 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{y}_3 - \mathbf{y}'_3 \\ \mathbf{f}_7 = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_4 + \mathbf{b} + \mathbf{x}'_4 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_4 + \mathbf{x}'_4 \cdot \mathbf{d} \\ \mathbf{f}_8 = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}_4 + \mathbf{x}'_4 \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{y}_4 - \mathbf{y}'_4 \end{cases}$$

(3.6)

e, a partir do sistema 3.6, define-se a matriz \mathbf{F} , dada por

$$\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1 \quad \mathbf{f}_2 \quad \mathbf{f}_3 \quad \mathbf{f}_4 \quad \mathbf{f}_5 \quad \mathbf{f}_6 \quad \mathbf{f}_7 \quad \mathbf{f}_8]^T . \quad (3.7)$$

Neste modelo, os elementos da matriz do sistema óptico são considerados como parâmetros, pois o mesmo sistema óptico pode ser utilizado para vários conjuntos de pontos.

Como observações, consideram-se os elementos que definem a posição dos pontos, tanto no espaço objeto quanto no espaço imagem, logo:

- parâmetros : a, b, c e d ;
- observações : x_i, y_i, x_i' e y_i' .

As equações f_1 até f_8 na eq. 3.6, são definidas como sendo funções de parâmetros e observações.

O método de ajustamento é o combinado, pois parte do princípio de que se os parâmetros ajustados, X_a , e observações ajustadas L_a satisfazem o modelo implícito;

$$F(L_a, X_a) = 0 \quad . \quad (3.8)$$

3.5.2 - MODELO MATEMÁTICO LINEARIZADO

Os parâmetros ajustados X_a podem ser obtidos a partir de parâmetros iniciais aproximados X_0 com a adição, à estes, de um vetor de correção X . Esta correção é determinada durante o processo de ajustamento.

$$X_a = X_0 + X \quad . \quad (3.9)$$

As observações ajustadas L_a diferem das observações medidas L_b , de um resíduo V . Este resíduo também é determinado durante o processo de ajustamento.

$$L_a = L_b + V \quad . \quad (3.10)$$

O vetor dos parâmetros ajustados é expresso por:

$$X = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \\ d_1 \end{bmatrix} \quad e, \quad (3.11)$$

o vetor dos parâmetros iniciais por:

$$\mathbf{X}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_0 \\ \mathbf{b}_0 \\ \mathbf{c}_0 \\ \mathbf{d}_0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Para as observações ajustadas e para as observações efetuadas durante o processo de medição têm-se, respectivamente:

$$\mathbf{L}_a = [y_{1a} \quad y'_{1a} \quad x_{1a} \quad x'_{1a} \quad y_{2a} \quad y'_{2a} \quad x_{2a} \quad x'_{2a} \quad y_{3a} \quad y'_{3a} \quad x_{3a} \quad x'_{3a} \quad y_{4a} \quad y'_{4a} \quad x_{4a} \quad x'_{4a}]^T; \quad (3.13)$$

$$\mathbf{L}_b = [y_1 \quad y'_1 \quad x_1 \quad x'_1 \quad y_2 \quad y'_2 \quad x_2 \quad x'_2 \quad y_3 \quad y'_3 \quad x_3 \quad x'_3 \quad y_4 \quad y'_4 \quad x_4 \quad x'_4]^T. \quad (3.16)$$

A aplicação dos vetores 3.9 e 3.12 na eq. 3.8, resulta em:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}_0 + \mathbf{X}, \mathbf{L}_b + \mathbf{V}) = 0. \quad (3.15)$$

Linearizando por Taylor;

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}_0 + \mathbf{X}, \mathbf{L}_b + \mathbf{V}) = \mathbf{F}(\mathbf{L}_b, \mathbf{X}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}_a} \right|_{\mathbf{X}_0} \cdot (\mathbf{X}_a - \mathbf{X}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{L}_a} \right|_{\mathbf{L}_b} \cdot (\mathbf{L}_a - \mathbf{L}_b) = 0 \quad (3.16)$$

onde são definidas as matrizes:

- vetor erro de fechamento;

$$\mathbf{W} = \mathbf{F}(\mathbf{L}_b, \mathbf{X}_0), \quad (3.17)$$

-matriz dos coeficientes dos parâmetros;

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}_a} \right|_{\mathbf{X}_0} \quad (3.18)$$

- vetor de correção dos parâmetros;

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_a - \mathbf{X}_0, \quad (3.19)$$

- matriz dos coeficientes dos valores observados;

$$\mathbf{B} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{L}_a} \right|_{\mathbf{L}_b}, \quad (3.20)$$

- vetor dos resíduos;

$$\mathbf{V} = \mathbf{L}_a - \mathbf{L}_b, \quad (3.21)$$

Substituindo as equações descritas acima na eq. 3.18, têm-se o modelo matemático linearizado que pode ser expresso por;

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{V} + \mathbf{W} = \mathbf{0}. \quad (3.22)$$

3.5.3 - MATRIZES PARA O AJUSTAMENTO

A apresentação do modelo matemático linearizado, com as devidas dimensões das matrizes que o constituem, é:

$${}_r\mathbf{A}_{u \cdot u} \mathbf{X}_1 + {}_r\mathbf{B}_{n \cdot n} \mathbf{V}_1 + {}_n\mathbf{W}_1 = \mathbf{0};$$

onde:

r - número de equações ;

u - número de parâmetros e,

n - número de observações .

Neste caso em estudo, têm-se que:

$$r = 8, u = 4 \text{ e } n = 16.$$

A matriz \mathbf{A} é obtida pela derivação de cada uma das equações do sistema 3.6, em relação aos parâmetros, obedecida a seqüência das equações e a ordem dos parâmetros, no vetor dos parâmetros.

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}}, \text{ ou ainda,}$$

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & 1 & x'_1 \cdot x_1 & x'_1 \\ y_1 & 0 & x'_1 \cdot y_1 & 0 \\ x_2 & 1 & x'_2 \cdot x_2 & x'_2 \\ y_2 & 0 & x'_2 \cdot y_2 & 0 \\ x_3 & 1 & x'_3 \cdot x_3 & x'_3 \\ y_3 & 0 & x'_3 \cdot y_3 & 0 \\ x_4 & 1 & x'_4 \cdot x_4 & x'_4 \\ y_4 & 0 & x'_4 \cdot y_4 & 0 \end{bmatrix}$$

(3.23)

A matriz **B**, corresponde às derivações das equações do sistema 3.6, em relação às observações, respeitando-se a ordem apresentada no vetor das observações.

$$B = \frac{\partial F}{\partial L}, \quad \text{ou seja;}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a+cx_1 & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a+cx_1 & -1 & 0 & cy_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a+cx_1 & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a+cx_1 & -1 & 0 & cy_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a+cx_1 & d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a+cx_1 & -1 & 0 & cy_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a+cx_1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a+cx_1 & -1 & 0 & cy_1 \end{bmatrix}$$

(3.24)

e o vetor erro de fechamento, é expresso por

$$W = F(L_b, X_0),$$

$$W = \begin{bmatrix} a.x_1 + b + x'_1.c.x_1 + x'_1.d \\ a.y_1 + x'_1.c.y_1 - y'_1 \\ a.x_2 + b + x'_2.c.x_2 + x'_2.d \\ a.y_2 + x'_2.c.y_2 - y'_2 \\ a.x_3 + b + x'_3.c.x_3 + x'_3.d \\ a.y_3 + x'_3.c.y_3 - y'_3 \\ a.x_4 + b + x'_4.c.x_4 + x'_4.d \\ a.y_4 + x'_4.c.y_4 - y'_4 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Uma outra matriz de suma importância em um ajustamento é a matriz dos pesos P . Esta matriz é quadrada de ordem n . No desenvolvimento de todo o processo será suposto que as observações são não correlacionadas, o que fará com que a matriz dos pesos seja diagonal. O indicativo dos pesos de cada observação pode ser informado por meio desta matriz. Neste caso, será suposto que todas as observações possuem o mesmo peso.

$$P = \sigma_0^2 \sum_{L_b}^{-1} \quad (3.26)$$

Na matriz dos pesos, σ_0^2 é a variância da unidade de peso e $\sum_{L_b}^{-1}$ é a matriz variância-covariância das observações.

Duas outras matrizes auxiliares serão usadas e elas são :

$$M = B.P^{-1}.B^T \quad (3.27)$$

$$K = -M^{-1}.(A.X + W). \quad (3.28)$$

3.5.4 - ITERAÇÕES

O modelo matemático a ser ajustado não é linear. Nesta situação devem ser efetuadas iterações, até que a convergência desejada seja atingida.

O método combinado de ajustamento exige um processamento especial para que as iterações sejam efetuadas.

O modelo matemático linearizado, por Taylor , é :

$$\left. \frac{\partial F}{\partial X_{a_i}} \right|_{X_{a_{i-1}}} \cdot (X_{a_i} - X_{a_{i-1}}) + \left. \frac{\partial F}{\partial L_{a_i}} \right|_{L_{a_{i-1}}} \cdot (L_{a_i} - L_{a_{i-1}}) + F(X_{a_{i-1}} - L_{a_{i-1}}) + \left. \frac{\partial F}{\partial L_{a_i}} \right|_{L_{a_{i-1}}} \cdot (L_{a_i} - L_{a_{i-1}}) = 0 \quad (3.29)$$

O modelo descrito na eq. 3.29 corresponde a

$$A_i \cdot X_i + B_i \cdot V_i + W_{i-1} - B_i \cdot V_{i-1} = 0 , \quad (3.30)$$

onde;

$$W_i = W_{i-1} - B_i \cdot V_{i-1} \quad (3.31)$$

3.5.5 - PROGRAMA COMPUTACIONAL MATRIZ.FOR

É o programa mais importante. É ele que vai determinar a matriz do sistema óptico. Ele também faz a aplicação do teste estatístico de χ^2 para verificar o grau de confiabilidade dos resultados obtidos. O teste de χ^2 permite verificar se a matriz obtida matematicamente e a determinada fotogrametricamente se correspondem. Este programa aplica o teste e fornece no seu relatório final o nível de confiança calculado.

Para a verificação desta correspondência, são verificados cada um dos quatro elementos da matriz do sistema óptico e o determinante desta matriz. Com isso têm-se $n=5$ e que o número de graus de liberdade é igual a 4. De acordo com Victor MIRSHAWKA (1984, p. 70) os valores de χ^2 para 4 graus de liberdade são apresentados na tabela 3.2

TABELA 3.2 - VALORES DE χ^2 PARA VÁRIOS NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA

nível de significância	10%	5%	2,5%	1%	0,5%
χ^2	1,06	0,711	0,484	0,297	0,207

A entrada dos dados é feita pelos arquivos de dados PONTOS.DAT (anexo 10) e XISZERO.DAT (anexo 11).

No primeiro arquivo estão as informações relativas aos quatro pontos, que foram gerados pelo programa PONTOS.FOR. Os dados, dele constantes, são apresentados na seguinte ordem:

N(I) - número de ordem do ponto;
 YY(I) - cota do objeto;
 YYL(I) - cota da imagem;
 XX(I) - distância do objeto até a lente;
 XXL(I) - distância da imagem até a lente .

O segundo arquivo de dados fornece informações sobre os parâmetros iniciais, o peso das observações, a precisão desejada para a interrupção das iterações e o número limite de iterações a serem efetuadas para a situação em que não haja convergência ou que a mesma seja lenta.

As variáveis do arquivo XISZERO.DAT são:

X0(1,1) - parâmetro inicial a ;
 X0(2,1) - parâmetro inicial b ;
 X0(3,1) - parâmetro inicial c ;
 X0(4,1) - parâmetro inicial d ;
 PPP - peso das observações ;
 XITE - critério de convergência ;
 LIM - limite da quantidade de iterações.

Os resultados finais são gravados pelo programa computacional no arquivo MATRIZ.DAT (anexo 12), onde é fornecido um relatório geral.

3.5.6 - PROGRAMA COMPUTACIONAL MATQUI.FOR

O capítulo 5 versará sobre a influência dos erros das medidas. O programa desenvolvido em linguagem FORTRAN, MATQUI.FOR (anexo 5), é uma pequena variação do programa MATRIZ.FOR. Ele introduz erros nas observações e calcula a matriz do sistema óptico, aplica o teste de χ^2 e, no caso em que o valor de χ^2 esteja abaixo de um valor estipulado, ele acrescenta um erro maior um pouco nas observações e refaz todo o cálculo e testa novamente o resultado obtido . Os resultados são apresentados no arquivos de dado MATQUI.DAT.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTOS E SIMULAÇÕES

Neste capítulo é feita a aplicação do método para a determinação da matriz do sistema óptico pelo processo fotogramétrico.

Inicialmente é proposto um sistema óptico constituído por uma única lente e, matematicamente, é determinada a matriz deste sistema. Em seguida é feita a simulação de pontos no espaço objeto e, com o uso da matriz do sistema óptico, determinam-se os correspondentes homólogos no espaço imagem. Com o conhecimento destes pontos, ignora-se a matriz que foi determinada matematicamente e, com a aplicação do método fotogramétrico, determina-se novamente a matriz do sistema óptico. Com isso, têm-se condições de efetuar testes estatísticos para verificar a validade do método e a qualidade dos resultados obtidos em cada aplicação, em função das condições utilizadas. O teste estatístico que mais se adequa à situação em estudo é o χ^2 (qui quadrado), pois ele permite avaliar se as matrizes, determinada matematicamente e a determinada pelo método fotogramétrico, se correspondem ou não.

No processo de ajustamento (programa MATRIZ.FOR), existe a necessidade de escolha de parâmetros iniciais e de outros elementos auxiliares. Para dar subsídio à decisão, o programa será executado para várias situações, e com isso serão tomadas as decisões finais.

Outras análises serão efetuadas, para outros conjuntos de pontos do espaço objeto, para que se obtenham informações sobre algumas condições para a aplicação do método.

4.1 - EXPERIMENTO Nº 1

4.1.1 - DETERMINAÇÃO GEOMÉTRICA DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO

4.1.1.1 - SISTEMA DE UMA SÓ LENTE

É escolhido um sistema óptico constituído por uma só lente, fig. 2.10, com os seguintes elementos:

- raio de curvatura do primeiro dióptro :

$$r_1 = 120 \text{ mm} ;$$

- raio de curvatura do segundo dióptro onde, segundo Robert EISBERG e Lawrence LERNER (1981, p. 1406), é considerado como negativo porque o raio de curvatura da superfície onde ocorre a refração, está posicionado do lado oposto ao do raio luminoso refratado.

$$r_2 = - 150 \text{ mm ;}$$

- espessura da lente:

$$e = 18 \text{ mm ;}$$

- índice de refração do material de que é constituída a lente:

$$n = 1,5 \text{ .}$$

Com estes dados é criado o arquivo LENTE.DAT , que corresponde aos dados relativos à lente e que servirá de entrada para o programa SISTEMA.FOR , desenvolvido em linguagem FORTRAN.

- arquivo LENTE.DAT;

120., -150., 18., 1.5 .

O programa SISTEMA.FOR apresenta dois arquivos de saída, o SISTEMA.DAT com os elementos a , b , c e d da matriz do sistema óptico S , que será utilizado pelos programas PONTOS.FOR e o arquivo de saída RELAT.DAT.

- arquivo SISTEMA.DAT;

9.500000000000000E-001 12.000000000000000 -7.333333333333333E-003
9.600000000000000E-001

O arquivo de saída RELAT.DAT (anexo 7), fornece um relatório geral sobre o sistema óptico determinado matematicamente. Nele são apresentados, inicialmente, os elementos geométricos do sistema óptico, neste caso constituído por uma única lente, e os elementos físicos.

Como informação adicional, para observação e análise, é feito o cálculo da distância focal do sistema óptico, aproveitando que é esta uma das potencialidades de uso da matriz do sistema óptico e cada uma das matrizes parciais, relativas aos fenômenos físicos envolvidos, que são: a matriz da refração no primeiro dióptro, a matriz da refração no segundo dióptro e a matriz da transmissão no interior da lente.

A matriz do sistema óptico é apresentada e a seguir o valor do seu determinante. O valor deste determinante teoricamente deve ser unitário.

- arquivo RELAT.DAT;

RELAT.DAT (RELATORIO DO SISTEMA.FOR)

RAIO DE CURVATURA DA PRIMEIRA FACE (mm) = 120.000

RAIO DE CURVATURA DA SEGUNDA FACE (mm) = -150.000

ESPESSURA DA LENTE (mm) = 18.000

INDICE DE REFRACAO = 1.5000

DISTANCIA FOCAL DA LENTE(mm): f= 133.333333

MATRIZ DA PRIMEIRA REFRACAO

1.00000000	.00000000
-.00277778	.66666667

MATRIZ DA SEGUNDA REFRACAO

1.00000000	.00000000
-.00333333	1.50000000

MATRIZ DE TRANSMISSAO

1.00000000	18.00000000
.00000000	1.00000000

MATRIZ DO SISTEMA OPTICO

.95000000	12.00000000
-.00733333	.96000000

DETERMINANTE DA MATRIZ DO SISTEMA OPTICO

DELTA = 1.0000000000000000

4.1.2 - DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DO ESPAÇO OBJETO E IMAGEM

Nesta etapa, a partir de pontos no espaço objeto fornecidos pelo arquivo de dados PTOBJ.DAT, são determinados os pontos do espaço imagem, com o uso da matriz do sistema óptico calculada anteriormente.

Os elementos escolhidos para compor o arquivo PTOBJ.DAT são apresentados na seguinte ordem: distância do objeto até o sistema óptico, cota do objeto e direção de um raio luminoso que parte da extremidade do objeto, sendo que este último elemento é utilizado apenas para a determinação dos dados do espaço imagem, não sendo utilizado na sequência dos programas, para a determinação da matriz do sistema óptico. A fig. 3.2, mostra para cada ponto, o significado desses dados, os quais são:

$x_1 = 500 \text{ mm}$	$y_1 = 5 \text{ mm}$	$\theta_1 = 0$
$x_2 = 1698 \text{ mm}$	$y_2 = 12 \text{ mm}$	$\theta_2 = 0,82 \text{ rad}$
$x_3 = 2000 \text{ mm}$	$y_3 = -80 \text{ mm}$	$\theta_3 = 1,5 \text{ rad}$
$x_4 = 3245 \text{ mm}$	$y_4 = -43 \text{ mm}$	$\theta_4 = 0,22 \text{ rad}$

Com esses dados é criado o arquivo de dados PTOBJ.DAT para o programa PONTOS.FOR, que determina os pontos do espaço imagem.

- PTOBJ.DAT

```
500., 5., 0.0,
1698., 12., 0.82,
2000., -80., 1.5,
3245., -43., 0.22,
```

O resultado é apresentado no arquivo de dados PONTOS.DAT, na seguinte sequência, para cada linha:

- número de ordem do ponto;
- cota do objeto¹ ;
- cota da imagem;
- distância do objeto até a lente;
- distância da imagem até a lente.

¹ Cotas com sinal positivo indicam objeto orientado para cima do eixo. Cotas com sinal negativo indicam objetos orientados para baixo do eixo, tanto para o objeto quanto para a imagem.

- PONTOS.DAT;

1,	5.00000,	-1.84729,	500.00000,	179.92611
2,	12.00000,	-1.04420,	1698.00000,	141.41142
3,	-80.00000,	5.83658,	2000.00000,	139.49416
4,	-43.00000,	1.88294,	3245.00000,	135.51671

4.1.3 - DETERMINAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO

Como o método em estudo visa posterior aplicação fotogramétrica, à ele será dada a denominação de método fotogramétrico.

O programa PONTOS.FOR, anteriormente aplicado, gerou os elementos que simulam as observações, no terreno e na foto, para a determinação da matriz do sistema óptico. Mais um arquivo de dados deve ser criado para a aplicação do programa MATRIZ.FOR, o qual é o arquivo dos parâmetros iniciais XISZERO.DAT. A composição dos elementos constituintes deste arquivo é discutida a seguir.

4.1.3.1 - MONTAGEM DO ARQUIVO XISZERO.DAT

Inicialmente ele é composto pelos elementos da matriz do sistema óptico, como parâmetros iniciais, os quais são escolhidos sem nenhum critério específico. A escolha recaiu nos valores:

$$a=1, \quad b=1, \quad c=1, \quad e \quad d=1 \quad .$$

Na composição do arquivo XISZERO.DAT, existe a necessidade de determinar o valor do peso a ser atribuído às observações, ao critério de convergência para determinar o momento da interrupção das iterações e o número máximo de iterações desejado. De maneira aleatória, são escolhidos os valores :

- pesos das observações:

$$P=1000;$$

- critério de convergência:

Critério de convergência = 0,0001 ;

- número máximo de iterações:

número de iterações = 50 .

Com isso, além do arquivo PONTOS.DAT, já apresentado, têm-se o arquivo XISZERO.DAT (Anexo 11), que é montado da seguinte maneira:

```
1.D0
1.D0
1.D0
1.D0
1000.D0
0.0001D0
50
```

4.1.3.2 - APLICAÇÃO DO PROGRAMA MATRIZ.FOR

Após todo o processamento efetuado pelo programa MATRIZ.FOR, chega-se ao resultado final, o qual é gravado no arquivo MATRIZ.DAT :

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	5.0000000	-1.8472900	500.0000000	179.9261100
2	12.0000000	-1.0442000	1698.0000000	141.4114200
3	-80.0000000	5.8365800	2000.0000000	139.4941600
4	-43.0000000	1.8829400	3245.0000000	135.5167100

PARAMETROS INICIAIS

```
a = 1.000000    b = 1.000000
c = 1.000000    d = 1.000000
```

PESO = 1000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000100000

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a = .9500029873 b = 12.0003787272
c = -.00733333568 d = .9600013701

NUMERO DE ITERACOES = 1
DETERMINANTE = 1.0000072286

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .0000000120
HIPOTESE NAO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 0,5%

4.1.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Visando comparar os resultados obtidos na determinação matricial com o resultado obtido matematicamente, é montada a tabela 4.1, com dados tirados dos arquivos SISTEMA.DAT (pág. 51) e MATRIZ.DAT (pág. 55).

Em uma primeira análise, verifica-se que os parâmetros iniciais estão escolhidos satisfatoriamente e, mais ainda, que os resultados já são consistentes para validar a eficiência do método fotogramétrico para a determinação da matriz de um sistema óptico. A prova disto, é que o valor obtido para χ^2 , foi bem abaixo do valor 0,207, extraído da tabela 3.2. Para esta situação, onde o grau de liberdade tem valor igual a 4, com nível de significância 0,5%. O valor obtido para χ^2 , leva à decisão de não rejeitar à hipótese de que a matriz obtida fotogrametricamente é a mesma obtida matematicamente, validando então, esta aplicação do método.

Pode-se afirmar também que a probabilidade de que a matriz obtida fotogrametricamente corresponde a obtida matematicamente é de 99,5%.

TABELA 4.1 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

	MÉTODO MATEMÁTICO	MÉTODO FOTOGRAFAMÉTRICO
a	0,95	0,9500029873
b	12	12,000378727
c	-0,00733333333	-0,00733333568
d	0,96	0,9600013701
determinante	1,0	1,0000072286

Não obstante considerar-se que os parâmetros iniciais são adequados, principalmente em virtude da rapidez da convergência, passar-se-á para o teste com outros parâmetros iniciais, também escolhidos aleatoriamente.

4.1.5 - TESTE COM NOVOS PARÂMETROS INICIAIS

Os novos parâmetros iniciais são escolhidos sem nenhum critério específico, compondo um novo arquivo de dados XISZERO.DAT.

```
-1000.D0
96781.D0
0.00341D0
9879.D0
1000.D0
0.0001D0
50
```

Após a aplicação do programa MATRIZ.FOR ao arquivo com as informações sobre os parâmetros iniciais, têm-se como resultado:

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	5.0000000	-1.8472900	500.0000000	179.9261100
2	12.0000000	-1.0442000	1698.0000000	141.4114200
3	-80.0000000	5.8365800	2000.0000000	139.4941600
4	-43.0000000	1.8829400	3245.0000000	135.5167100

PARAMETROS INICIAIS

```
a = -1000.000000    b = 96781.000000
c =   .003410      d = 9879.000000
```

PESO = 1000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000100000

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

```
a =   .9500029889    b =   12.0003787572 ,
```

c = -.0073333568 d = .9600013716

NUMERO DE ITERACOES = 1

DETERMINANTE = 1.0000072319

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .0000000120

HIPOTESE NAO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 0,5%

A comparação entre os elementos calculados pelos dois processos mostra que mesmo com parâmetros iniciais escolhidos com valores bem diferentes dos parâmetros ajustados, a convergência é rápida, apenas uma iteração, e os resultados satisfatórios.

Observa-se na tabela 4.2, que os resultados tiveram uma pequena variação nas últimas casas decimais, fazendo com que χ^2 seja ainda muito pequeno, 0,0000000120, repetindo o valor do teste da execução anterior, do programa MATRIZ, FOR, caracterizando novamente a situação de não rejeição da hipótese de que as duas matrizes se correspondem, de acordo com a tabela 3.2.

A tabela 4.2 foi montada com dados dos arquivos SISTEMA.DAT (pág. 51) e MATRIZ.DAT (pág. 55).

TABELA 4.2 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA NOVOS PARÂMETROS INICIAIS

	MÉTODO MATEMÁTICO	MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO
a	0,95	0,9500029889
b	12	12,0003787572
c	-0,00733333333	-0,0073333568
d	0,96	0,9600013716
determinante	1,0	1,0000072319

4.1.6 - TESTE COM NOVO PESO

Agora estudar-se-á os efeitos do peso das observações sobre os parâmetros ajustados. Como valores iniciais dos parâmetros, são tomados aqueles utilizados no item 4.1.3.2, sendo que apenas o peso das observações é mudado para um valor maior, passando de 1.000 para 1.000.000, neste caso, o arquivo XISZERO.DAT passa a ser então:

1.D0
 1.D0
 1.D0
 1.D0
 1000000.D0
 0.0001D0
 20

Após a aplicação do programa PONTOS.FOR e MATRIZ.FOR, obtem-se:
 MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	5.00000000	-1.8472900	500.0000000	179.9261100
2	12.00000000	-1.0442000	1698.0000000	141.4114200
3	-80.00000000	5.8365800	2000.0000000	139.4941600
4	-43.00000000	1.8829400	3245.0000000	135.5167100

PARAMETROS INICIAIS

a = 1.000000 b = 1.000000
 c = 1.000000 d = 1.000000

PESO = 1000000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000100000

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a = .9500029876 b = 12.0003787485
 c = -.0073333568 d = .9600013702

NUMERO DE ITERACOES = 1

DETERMINANTE = 1.0000072292

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .0000000120

HIPOTESE NAO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 0,5%

Comparando-se as duas situações com os pesos 1.000 e 1.000.000, tabela 4.3, basendo-se em SISTEMA.DAT (pág. 51) e MATRIZ.DAT (acima), verifica-se que a influência dos mesmos é pequena.

É importante verificar que o valor do determinante da matriz do sistema óptico tem se mantido praticamente unitário, de acordo com o descrito no capítulo 2.7.

Este último valor atribuído ao peso será mantido para os próximos ensaios.

TABELA 4.3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA NOVO PESO

	P=1.000	P=1.000.000
a	0,9500029889	0,9500029876
b	12,0003787572	12,0003787485
c	-0,0073333568	-0,0073333568
d	0,9600013716	0,9600013702
determinante	1,0000072319	1,0000072292

4.1.7 - TESTES COM VÁRIOS VALORES PARA O CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA

Um novo teste será feito variando-se o critério de convergência, onde agora são atribuídos os valores apresentados na tabela 4.4, sendo que para a composição do arquivo dos valores iniciais, houve a opção de manter os demais elementos da matriz do sistema óptico como sendo iguais aos do primeiro ensaio, isto é, são unitários.

TABELA 4.4 - TESTE COM VÁRIOS CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA

Critério de convergência	0,0001	0,000001	0,0000001	0,00000001	0,000000001
a	0,9500029866	0,9500029868	0,9500029868	0,9500029868	0,9500029488
b	12,0003787146	12,0003787188	12,0003787188	12,0003787188	12,0003766426
c	-0,0073333568	-0,0073333568	-0,0073333568	-0,0073333568	-0,0073333560
d	0,9600013695	0,9600013695	0,9600013695	0,9600013695	0,9600012714
Δ	1,0000072272	1,0000072274	1,0000072274	1,0000072274	1,0000070123
nº iterações	1	2	2	2	50

A evolução dos valores calculados praticamente não varia para as situações em que o critério de convergência varia de 0,0001 até 0,000001. Para os valores seguintes da precisão, não houve qualquer mudança nos parâmetros calculados, exceto quando se exigiu uma precisão alta, 0,000000001, onde a mudança nos valores dos parâmetros, embora significativa

se forem considerada as últimas casas decimais, pode-se considerar que os resultados obtidos são consistentes, pois em todos os casos os valores de χ^2 foram semelhantes às situações analisadas em 4.1.5 e 4.1.6 .

Foi determinado um limite máximo de 50 iterações, onde a partir daí, as iterações são interrompidas e os resultados apresentados. Somente no último caso o número de iterações pode ser considerado como alto, se comparado com os valores obtidos para as outras situações. Considera-se que não se tem ganho significativo com este aumento testado para a precisão das iterações, pois o mesmo só demanda em maior tempo de processamento. Como estes testes são efetuados em um micro computador AT 486 - 40 MHz, com co-processador aritmético, optar-se-á por manter o último valor para a precisão das iterações, mesmo que demande um maior tempo de processamento, o que não será tão significativo para o equipamento utilizado, pois deseja-se uma precisão maior nos resultados a serem obtidos.

4.2 - EXPERIMENTO Nº 2

4.2.1 - TESTE COM UMA NOVA LENTE

Visando testar a aplicação do método, é refeito todo o processo para um novo sistema óptico, também constituído por uma única lente. Os pontos do espaço objeto, inicialmente, são os mesmos utilizados no item 4.1 .

4.2.1.1 - DADOS DO SISTEMA ÓPTICO

O primeiro arquivo de dados é o LENTE.DAT , com as informações a respeito das características da lente.

300., -200., 30., 1.55

4.2.1.2 - PONTOS DO ESPAÇO OBJETO E IMAGEM

A execução do programa PONTOS.FOR, fornece os dois arquivos de dados seguintes, sendo o primeiro ;

RELAT.DAT (RELATORIO DO SISTEMA.FOR)

RAIO DE CURVATURA DA PRIMEIRA FACE (mm) = 300.000

RAIO DE CURVATURA DA SEGUNDA FACE (mm) = -200.000

ESPESSURA DA LENTE (mm) = 30.000

INDICE DE REFRACAO = 1.5500

DISTANCIA FOCAL DA LENTE(mm): f= 218.181818

MATRIZ DA PRIMEIRA REFRACAO

1.00000000	.00000000
-.00118280	.64516129

MATRIZ DA SEGUNDA REFRACAO

1.00000000	.00000000
-.00275000	1.55000000

MATRIZ DE TRANSMISSAO

1.00000000	30.00000000
.00000000	1.00000000

MATRIZ DO SISTEMA OPTICO

.96451613	19.35483871
-.00448575	.94677419

DETERMINANTE DA MATRIZ DO SISTEMA OPTICO

DELTA = 1.0000000000000000

O segundo arquivo é o SISTEMA.DAT

9.6451612903226E-001 19.35483870967700 -4.4857526881720E-003
 9.4677419354839E-001

Os pontos do espaço objeto são os mesmos usados anteriormente, em 4.1.2 ;

500., 5., 0.0,
1698., 12., 0.82,
2000., -80., 1.5,
3245., -43., 0.22

O programa PONTOS.FOR determina os pontos do espaço imagem. O arquivo PONTOS.DAT apresenta os pontos com os quais se irá trabalhar.

1,	5.00000,	-3.85772,	500.00000,	387.01649
2,	12.00000,	-1.79909,	1698.00000,	248.44000
3,	-80.00000,	9.96918,	2000.00000,	242.79780
4,	-43.00000,	3.15956,	3245.00000,	231.39801

4.2.1.3 - PARÂMETROS INICIAIS

Os parâmetros iniciais são:

1.D0
1.D0
1.D0
1.D0
1000000.D0
0.0000000001D0
50

4.2.1.4 - CÁLCULO DA MATRIZ DO SISTEMA ÓPTICO

O resultado final é:

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	5.0000000	-3.8577200	500.0000000	387.0164900
2	12.0000000	-1.7990900	1698.0000000	248.4400000
3	-80.0000000	9.9691800	2000.0000000	242.7978000
4	-43.0000000	3.1595600	3245.0000000	231.3980100

PARAMETROS INICIAIS

a = 1.000000 b = 1.000000
 c = 1.000000 d = 1.000000

PESO = 1000000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .0000000001

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a = .9645162227 b = 19.3547945311
 c = -.0044857531 d = .9467744087
 NUMERO DE ITERACOES = 3
 DETERMINANTE = 1.0000001064

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .0000000001

HIPOTESE NAO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 0,5%

Novamente conclui-se que os resultados obtidos foram bons, a exemplo dos anteriores. A hipótese de que as duas matrizes se correspondem não é rejeitada.

4.2.2 - TESTE PARA UM NOVO CONJUNTO DE PONTOS

Um novo teste é feito, mantendo-se a lente e utilizando-se um novo conjunto de pontos.

4.2.2.1 - PONTOS DO ESPAÇO OBJETO E IMAGEM

Fazendo uso do mesmo sistema óptico do item 4.2 , visando analisar o comportamento, um novo conjunto de pontos é proposto, para a determinar a matriz do sistema óptico;

1500., 8., 0.22,
 349., -24., 0.45,
 2892., 0.08, 0.0,
 583., -9., 0.111

O arquivo PONTOS.DAT agora é:


```

1, 8.00000, -1.38364, 1500.00000, 253.57417
2, -24.00000, 38.78766, 349.00000, 575.30337
3, .08000, -.00665, 2892.00000, 233.55482
4, -9.00000, 5.39433, 583.00000, 348.63396

```

4.2.2.2 - APLICAÇÃO DO MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO COM O NOVO CONJUNTO DE PONTOS

Determinando-se a matriz do sistema óptico fotogrametricamente, têm-se como resultado;

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	8.0000000	-1.3836400	1500.0000000	253.5741700
2	-24.0000000	38.7876600	349.0000000	575.3033700
3	.0800000	-.0066500	2892.0000000	233.5548200
4	-9.0000000	5.3943300	583.0000000	348.6339600

PARAMETROS INICIAIS

```

a = 1.000000    b = 1.000000
c = 1.000000    d = 1.000000

```

PESO = 1000000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000000001

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

```

a = .9645162103    b = 19.3547857149
c = -.0044857529   d = .9467743300

```

NUMERO DE ITERACOES = 3

DETERMINANTE = .9999999754

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .0000000001

HIPOTESE NAO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 0,5%

4.2.2.3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

TABELA 4.5 - COMPARAÇÃO PARA NOVOS PONTOS OBJETO

	matematicamente	pontos originais	novos pontos
a	0,9645161290	0,9645162227	0,9645162103
b	19,3548387097	19,3547945311	19,3547857149
c	-0,0044857527	-0,0044857531	-0,0044857529
d	0,9467741935	0,9467744087	0,9467743300
determinante	1,0000000000000000	1.0000001064	0,9999999754

A tabela 4.5 mostra que, mesmo com um novo conjunto de pontos, a os elementos determinados praticamente são os mesmos. Com isso aumenta a confiança na aplicação do método.

Com relação ao valor de χ^2 , não é rejeitada a hipótese de que a matriz calculada fotogrametricamente corresponde à calculada matematicamente.

4.3 - EXPERIMENTO 3

4.3.1 - ESTUDO DA DISPOSIÇÃO DOS PLANOS QUE CONTÉM OS OBJETOS

Em um laboratório deve-se procurar ao máximo simplificar o processo de medição, com esta finalidade, procura-se verificar qual o comportamento do processo quando forem usados pontos, aos pares, de maneira que cada par esteja à mesma distância do sistema óptico, fig. 4.1, caracterizando posicionamento dos objetos y_1 e y_2 , em um único plano, distante x_1 do sistema óptico S, e os objetos y_3 e y_4 em outro plano a uma distância x_2 do sistema óptico. Como consequência disto, existem apenas dois planos imagens com os correspondentes pontos homólogos.

Tal procedimento, em princípio, simplificaria o trabalho de laboratório.

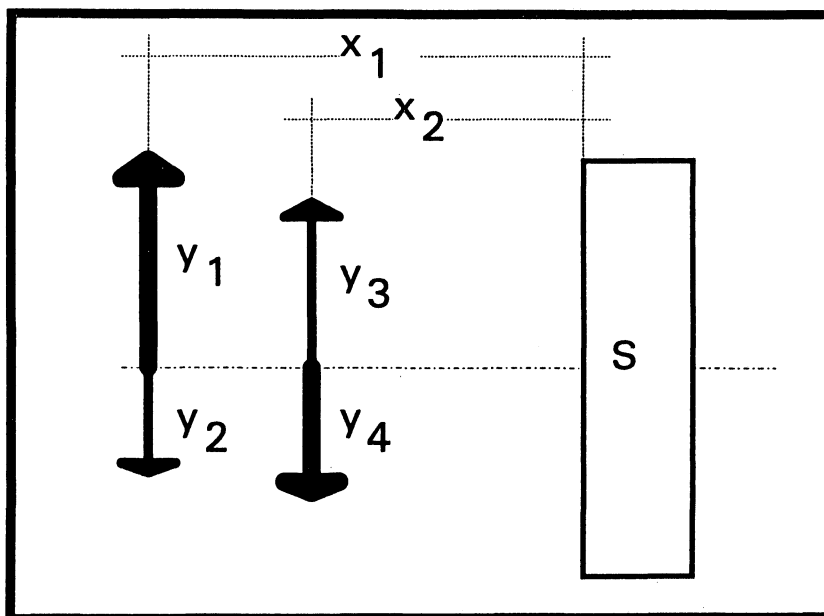


fig. 4.1

4.3.1.1 - PONTOS ALVO

Na sequência de aplicação do método, ter-se-ia:

a) Arquivo de dados com as informações sobre os pontos no terreno, PTOBJ.DAT

```
1500., 8., 0.22,
1500., -24., 0.45,
2892., 0.08, 0.0,
2892., -9., 0.111
```

b) Arquivo de dados com as informações dos pontos no terreno e na foto, PONTOS.DAT, após a aplicação do programa PONTOS.FOR.

```
1, 8.00000, -1.38364, 1500.00000, 253.57417
2, -24.00000, 4.15092, 1500.00000, 253.57417
3, .08000, -.00665, 2892.00000, 233.55482
4, -9.00000, .74838, 2892.00000, 233.55482
```

4.3.1.2 - APLICAÇÃO DO MÉTODO

A saída do MATRIZ.FOR apresenta, mais uma vez, o resultado final.

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	8.0000000	-1.3836400	1500.0000000	253.5741700
2	-24.0000000	4.1509200	1500.0000000	253.5741700
3	.0800000	-.0066500	2892.0000000	233.5548200
4	-9.0000000	.7483800	2892.0000000	233.5548200

PARAMETROS INICIAIS

a = 1.000000 b = 1.000000
c = 1.000000 d = 1.000000

PESO = 1000000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000000001

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a = .9645136819 b = 19.3643609224
c = -.0044857435 d = .9467373553

NUMERO DE ITERACOES = 3

DETERMINANTE = 1.0000046883

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .0000046862

HIPOTESE NAO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 0,5%

4.3.2 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A comparação dos resultados obtidos para as duas situações, na tabela 4.6, a primeira coluna com a matriz do sistema óptico determinada matematicamente, a segunda com os pontos objetos dispostos em vários planos e a terceira com os pontos dispostos aos pares, cada par de pontos em um plano, fornece a informação de que mesmo nesta última aplicação o método é eficiente, principalmente pela análise do valor de χ^2 no relatório de saída fornecido pelo programa computacional.

Uma análise mais detalhada mostra que os últimos resultados obtidos não são tão bons quanto o obtido para a situação em que os pontos estavam dispostos em vários planos². De acordo com Mary A. A. OLIVAS (1980, p. 18) a correlação aumenta quando diminui o desnível entre os pontos, que corresponde à esta situação, pois quando dois pontos estão situados em um mesmo plano, existe correlação entre eles, ficando a quebra da mesma por conta do uso de dois planos objetos.

TABELA 4.6 - PONTOS OBJETO DISPOSTOS EM VÁRIOS PLANOS

	matematicamente (pág 62)	vários planos (pág. 65)	dois planos (pág. 68)
a	0,96451613	0,9645162103	0,9645136819
b	19,35483871	19,3547857149	19,3643609224
c	-0,00448575	-0,0044857529	-0,0044857435
d	0,94677419	0,9467743300	0,9467373553
determinante	1,0000000000000000	0,9999999754	1,0000046883

Tabela 4.6

4.3.3 - INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE OS PLANOS DOS OBJETOS

Para verificar a influência da distância entre os planos que contém os objetos, várias situações são analisadas, fazendo com que, gradativamente, esta distância diminua, caracterizando um aumento da correlação entre os pontos.

4.3.3.1 - PRIMEIRO CASO

Os dois planos que contém os objetos estão separados de 50 mm. Esta distância está apresentada no arquivo de saída do programa MATRIZ.FOR, na coluna **x**;

²O aumento do valor de χ^2 , em relação às aplicações em 4.1.3.2 e 4.2.2.2, caracteriza perda de precisão, porém este valor ainda está muito baixo, garantindo precisão para o método.

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	8.0000000	-1.3836400	1500.0000000	253.5741700
2	-24.0000000	4.1509200	1500.0000000	253.5741700
3	.0800000	-.0133200	1550.0000000	252.1343500
4	-9.0000000	1.4984700	1550.0000000	252.1343500

PARAMETROS INICIAIS

a = 1.000000 b = 1.000000
c = 1.000000 d = 1.000000

PESO = 1000000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000000001

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a = .9644555428 b = 19.4462756992
c = -.0044855142 d = .9464143146

NUMERO DE ITERACOES = 5

DETERMINANTE = 1.0000010775

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .0004321113

HIPOTESE NAO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 0,5%

4.3.3.2 - SEGUNDO CASO

A distância entre os planos agora é reduzida para 10 mm;

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	8.0000000	-1.3836400	1500.0000000	253.5741700
2	-24.0000000	4.1509200	1500.0000000	253.5741700
3	.0800000	-.0137300	1510.0000000	253.2773400
4	-9.0000000	1.5446100	1510.0000000	253.2773400

PARAMETROS INICIAIS

a = 1.000000 b = 1.000000
c = 1.000000 d = 1.000000

PESO = 1000000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000000001

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a = .9646531809 b = 19.1538518636
c = -.0044862936 d = .9475675229

NUMERO DE ITERACOES = 6
DETERMINANTE = 1.0000038284

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .0020877960
HIPOTESE NAO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 0,5%

4.3.3.3 - TERCEIRO CASO

Após mais uma redução, chegando-se a 3 mm, obtem-se o resultado abaixo, onde verifica-se que, embora satisfatório, teve-se um aumento no número de iterações, chegando inclusive ao número máximo determinado pelo programa computacional.

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	8.00000000	-1.3836400	1500.0000000	253.5741700
2	-24.0000000	4.1509200	1500.0000000	253.5741700
3	.08000000	-.0138000	1503.0000000	253.4846400
4	-9.00000000	1.5529800	1503.0000000	253.4846400

PARAMETROS INICIAIS

a = 1.000000 b = 1.000000
c = 1.000000 d = 1.000000

PESO = 1000000.000000
CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000000001
NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a = .9648550246 b = 18.8755819893
c = -.0044870896 d = .9486648910

NUMERO DE ITERACOES = 50
DETERMINANTE = 1.0000205144

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .0118710567
HIPOTESE NAO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 0,5%

4.3.3.4 - QUARTO CASO

A distância de 1 mm, entre os planos objetos, aqui proposta, não corresponde a uma situação que seria aplicável na prática, mas sim de uma situação para análise do comportamento do método. Observa-se que existe um significativo aumento no valor de χ^2 . Isto implica numa perda de confiabilidade da aplicação do método nestas condições.

No capítulo 5, será verificado que não se deve usar o posicionamento dos pontos em dois planos, pois isto exigirá uma altíssima precisão nas medidas das observações, para que o método atinja resultados satisfatórios. Observa-se que o nível de confiança de 2,5%, é incompatível com propósitos de trabalho a nível de calibração.

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	8.0000000	-1.3836400	1500.0000000	253.5741700
2	-24.0000000	4.1509200	1500.0000000	253.5741700
3	.0800000	-.0138300	1501.0000000	253.5442800
4	-9.0000000	1.5553900	1501.0000000	253.5442800

PARAMETROS INICIAIS

a =	1.000000	b =	1.000000
c =	1.000000	d =	1.000000

PESO = 1000000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000000001

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a =	.9628666861	b =	21.8415187389
c =	-.0044792484	d =	.9369683879

NUMERO DE ITERACOES = 50

DETERMINANTE = 1.0000092337

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .3195892118

HIPOTESE NAO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 2,5%

4.3.3.5 - QUINTO CASO

Agora a distância passa a ser de 0,5 mm, somente para efeito de estudos. Existe um perceptível aumento na correlação. Conforme pode ser percebido, não só pelo aumento de χ^2 ,

como também pelas sensíveis variações sofridas pelo elemento b, da matriz do sistema óptico.

Esta situação não é aconselhável para ser aplicada devido à baixa precisão que se pode estar obtendo.

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	8.0000000	-1.3836400	1500.0000000	253.5741700
2	-24.0000000	4.1509200	1500.0000000	253.5741700
3	.0800000	-.0138300	1500.5000000	253.5592200
4	-9.0000000	1.5559900	1500.5000000	253.5592200

PARAMETROS INICIAIS

a = 1.000000 b = 1.000000
c = 1.000000 d = 1.000000

PESO = 1000000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000000001

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a = .9672502235 b = 15.3412033628
c = -.0044965354 d = .9626031572

NUMERO DE ITERACOES = 50

DETERMINANTE = 1.0000603824

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = .8325845859

HIPOTESE NÃO REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA DE 10%

4.3.3.6 - SEXTO CASO

Quando se tentar dispor os pontos distantes de 0,3 mm, um do outro, a hipótese de que as matrizes obtidas fotogrametricamente e matematicamente se correspondam é rejeitada com nível de significância de 10%. Este valor é considerado muito alto.

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	8.0000000	-1.3836400	1500.0000000	253.5741700
2	-24.0000000	4.1509200	1500.0000000	253.5741700
3	.0800000	-.0138300	1500.3000000	253.5652000

4 -9.0000000 1.5562300 1500.3000000 253.5652000

PARAMETROS INICIAIS

a = 1.000000 b = 1.000000
c = 1.000000 d = 1.000000

PESO = 1000000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000000001

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a = .9736011128 b = 6.0410051961
c = -.0045215809 d = .9992795985

NUMERO DE ITERACOES = 50

DETERMINANTE = 1.0002146225

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = 9.1613355466

HIPOTESE REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA MAIOR QUE 10%

4.3.3.7 - SÉTIMO CASO (TODOS OS PONTOS OBJETO EM UM ÚNICO PLANO)

Uma outra execução é efetuada para a situação em que todos os pontos objetos estão em um único plano. Devido à correlação, os resultados não podem sequer ser apresentados, como os valores calculados para os elementos da matriz dos sistema óptico foram muito altos, não se teve espaço suficiente para as suas representações, já que foram mantidos os formatos de impressão definidos no programa MATRIZ.FOR. Somente o arquivo de dados MATRIZ.DAT é apresentado para mostrar esta situação. Conclui-se então que não houve convergência.

MATRIZ.DAT (SAIDA DO MATRIZ.FOR)

N	y	yL	x	xL
1	8.0000000	-1.3836400	1500.0000000	253.5741700
2	-24.0000000	4.1509200	1500.0000000	253.5741700
3	.0800000	-.0138400	1500.0000000	253.5741700
4	-9.0000000	1.5565900	1500.0000000	253.5741700

PARAMETROS INICIAIS

a = 1.000000 b = 1.000000
c = 1.000000 d = 1.000000

PESO = 1000000.000000

CRITERIO DE CONVERGENCIA = .000000001
 NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = 50

RESULTADO FINAL

a = ***** b = *****
 c = ***** d = *****

NUMERO DE ITERACOES = 50
 DETERMINANTE = *****

VALOR OBTIDO PARA QUI-QUADRADO = *****
 HIPOTESE REJEITADA COM NIVEL DE SIGNIFICANCIA MAIOR QUE 10%

4.3.3.8 - ANÁLISE

O acompanhamento da influência da distância entre os planos objeto, desde o item 4.3.3.1 até 4.3.3.7, indica que somente quando esses planos estiverem muito próximos, é que a correlação fará com que se tenha uma significativa perda da precisão dos resultados.

Em se tratando de situações em que se deseje determinar os elementos da matriz do sistema óptico à nível de calibração, no item 4.3.3.4 não se teria resultado satisfatório, pois é rejeitada a hipótese de que a matriz calculada matematicamente e a calculada pelo método fotogramétrico se correspondem, tanto com nível de significância de 0,5%, $\chi^2 = 0.207$, como com nível de significância de 1%, cujo valor para χ^2 é 0,297. Somente com nível de significância de 2,5%, $\chi^2 = 0,484$, é que não seria rejeitada a hipótese em estudo. Nos demais testes efetuados a probabilidade de erro é muito grande e eles não devem ser utilizados.

No item 4.3.3.3 e 4.3.3.4 verifica-se que o número de iterações foi 50, que é o número máximo que foi determinado para o programa efetuar. O resultado obtido foi satisfatório no primeiro caso, pois não houve rejeição da hipótese de que a matriz calculada matematicamente corresponde a matriz calculada pelo método fotogramétrico com nível de significância de 0,5% e razoável no segundo caso, com 2,5% de nível de segurança.

No item 4.3.3.5 e 4.3.3.6, verifica-se que não houve convergência dentro de níveis de significância satisfatórios para estudos a nível de calibração.

No último item deste capítulo, o 4.3.3.7, onde todos os pontos estão em um único plano, claramente não houve convergência para qualquer nível de significância.

CAPÍTULO 5

INFLUÊNCIA DOS ERROS DAS MEDIDAS

Em todos os testes efetuados até então, foram considerados que os pontos do espaço objeto e os pontos do espaço imagem estavam isentos de erros de medição, pois estes foram determinados matematicamente a partir de valores supostos para aqueles.

Visando-se ter uma estimativa da influência desses erros, é feita uma análise progressiva, com a introdução proposital de erros nas observações, a partir da situação ideal. Estes erros não são aplicados simultaneamente à todas as observações, eles são aplicados apenas a um conjunto de pontos de mesma natureza¹ e os demais são supostos como se tivessem tido uma medição ideal, com o intuito de analisar o efeito que somente estas observações eivadas de erros produzem sobre o resultado final.

A cada vez que esses erros forem introduzidos, ter-se-á um conjunto de quatro observações. Na primeira e na terceira observação optou-se por adiciona-los à medida ideal e, na segunda e na quarta observação o erro é subtraído. A matriz do sistema óptico é calculada, é feito o teste estatístico e se ele estiver com nível de significância abaixo de 1%, o erro seguinte é introduzido nas observações e novamente a matriz é calculada e testada, até que se tenha ultrapassado o nível de significância de 1%.

Os erros são aplicados na seguinte seqüência:

0,001mm , 0,002mm , 0,003mm , 0,004mm , 0,005mm , 0,010mm , 0,020mm , 0,030mm , 0,040mm , 0,050mm , 0,060mm , 0,070mm , 0,080mm , 0,090mm , 0,100mm , 0,200mm , 0,300mm , 0,400mm , 0,500mm , 0,600mm , 0,700mm , 0,800mm , 0,900mm e 1mm.

5.1 - INFLUÊNCIA DOS ERROS DE MEDIDA QUANDO OS PONTOS OBJETOS ESTÃO DISPOSTOS EM DOIS PLANOS

Pode-se prever que a obtenção dos valores das medidas das observações é muito trabalhosa, com isso deve-se reduzir ao máximo o número de observações. No experimento 3, item 4.3, foi verificado que os resultados obtidos são favoráveis, porém eles foram calculados à partir de situações ideais.

¹ Considera-se como conjunto de pontos de mesma natureza, aqueles que correspondem somente à cota do objeto, à cota da imagem, à distância do objeto até o sistema óptico ou à distância da imagem até o sistema óptico.

Aplicar-se-á aos pontos e ao sistema óptico propostos em 4.3.1.1 , que correspondem à situação onde os pontos do espaço objeto estão dispostos, dois à dois, em dois planos distintos.

5.1.1 - TESTE 1 (EFEITO NA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE)

A tabela 5.1 apresenta os resultados para cada um dos erros que foram introduzidos nas observações. A primeira linha corresponde à situação ideal, com erro de medição nulo. Da segunda linha em diante verifica-se a influência de cada erro sobre o valor de χ^2 , o determinante da matriz do sistema óptico e cada um dos elementos desta matriz.

Comparando-se os valores obtidos para χ^2 , entre as tabelas 3.2 e 5.1, conclui-se que para erro de até 0,004mm, na medida da distância do ponto objeto até à lente, ainda têm-se um nível de significância de 0,5%, cujo valor de χ^2 é 0,207, o que é muito bom, porém, para erro de 0,005mm, o nível de significância passa a ser de 2,5%.

Cada usuário deve definir o nível de significância que julgar satisfatório. Nestes testes considera-se que somente serão processadas as situações com níveis de significância menores de 1% pois, para valores maiores que este julga-se que houve perda significativa de precisão.

TABELA 5.1 - EFEITO NA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.000	.0000000119	1.0000070123	.9500028854	12.0003766426	-.0073333560	.9600012714
.001	.0006041063	.9833788645	.9419869798	11.9524286257	-.0072715939	.9516752101
.002	.0103819593	.9409193656	.9213088280	11.7519095266	-.0071121796	.9305649187
.003	.0480769589	.8806646227	.8911742209	11.4364985005	-.0068798379	.8999176015
.004	.1398831239	.8079130371	.8534249531	11.0008813128	-.0065887514	.8617406392
.005	.3191359216	.7279940411	.8100074888	10.4364467895	-.0062539076	.8181720250

5.1.2 - TESTE 2 (EFEITO NA DISTÂNCIA DA IMAGEM ATÉ A LENTE)

A situação apresentada na tabela 5.2 mostra que o uso de dois planos exigirá necessariamente grande precisão nas medidas do posicionamento dos planos das imagens. Um erro de 0,001mm implica em 0,5% de nível de significância e um erro de 0,002mm

corresponde a um nível bem maior do que 10%, o que é o motivo que levou a abandonar o uso de apenas dois planos.

TABELA 5.2 - EFEITO NA DISTÂNCIA DA IMAGEM ATÉ A LENTE

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.000	.0000000119	1.0000070123	.9500028854	12.0003766426	-.0073333560	.9600012714
.001	.0006041063	.9833788645	.9419869798	11.9524286257	-.0072715939	.9516752101
.002	53.86402408	2.5155835613	1.4940807337	36.7521358294	-.0115129937	1.4004975802

Também deve-se considerar que o posicionamento do plano imagem dependerá em muito da acuidade visual do operador e da profundidade de foco. Para que se tenha uma idéia da extensão da profundidade de foco, a mesma será calculada para cada um dos planos de posicionamento dos pontos objetos deste teste.

Para este cálculo será considerada abertura especificada com $n_f=1$, pois sempre que se efetua alguma focalização deve-se manter o diafragma com grande abertura.

A distância focal foi calculada no item 4.1.1.1 e mede 133,333mm. Para o cálculo de L, utiliza-se a equação 2.14, a qual é aplicada para cada um dos planos objeto:

a) plano que dista 1500mm da lente ($p \cong 1500\text{mm}$)

$$L = 0,585\text{mm};$$

b) plano que dista 2892mm da lente ($p \cong 2892\text{mm}$)

$$L = 0,549\text{mm}.$$

Nas duas situações calculadas acima, L é muito maior que o erro que se pode cometer sem perda significativa da precisão (tabela 5.2), que é de 0,002mm, quando da focalização da imagem para a tomada da foto. Por isso, opta-se por abandonar o uso de apenas dois planos para a aplicação do método fotogramétrico. Mesmo que se fizesse uso de um equipamento óptico convencional de observação, ter-se-ia uma melhoria da qualidade da observação, por exemplo em 5 vezes, conforme foi descrito no item 2.3, ainda assim não se teria uma melhoria da qualidade que justificasse o uso de dois planos.

Os efeitos dos erros nas cotas do objeto e da imagem não foram calculados em virtude de já se saber que o uso de 2 planos não é conveniente então, partiu-se para a verificação dos erros em pontos posicionados em 4 planos diferentes.

5.2 - INFLUÊNCIA DOS ERROS DE MEDIDA QUANDO OS PONTOS OBJETOS ESTÃO POSICIONADOS EM QUATRO PLANOS DISTINTOS.

5.2.1 - TESTE 1 (EFEITO NA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE)

Para os testes a seguir, serão utilizados os pontos do item 4.1.2 (pág. 53). A tabela 5.3 mostra que para nível de significância de 0,5% ($\chi^2 = 0,207$), o erro admissível é de aproximadamente 0,030mm. Para erro de medição de 0,040mm, já se teria grande perda na precisão. Para este caso o nível de significância caiu para 2,5% ($\chi^2 = 0,484$).

TABELA 5.3 - EFEITO NA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.000	.0000000022	.9999994509	.9500000306	11.9998376479	-.0073333332	.9600006461
.001	.0000060510	.9998872657	.9499758415	11.99148859	-.0073330721	.9599747443
.002	.0000975814	.9990707973	.9496487225	11.965974096	-.0073303977	.9596763802
.003	.0005756554	.9965507505	.9485431040	11.918056995	-.0073216389	.9586185768
.004	.0021872828	.9912504496	.9461428469	11.841985180	-.0073028118	.9562727907
.005	.0062926813	.9825107846	.9421212735	11.734815532	-.0072713959	.9523002186
.010	.0212872554	.9607229511	.9319232078	11.521686186	-.0071919432	.9419870979
.020	.0743832849	.9149795742	.9100434784	11.125109393	-.0070216543	.9195856260
.030	.1899265888	.8531629292	.8795535337	10.623962568	-.0067843629	.8880484039
.040	.3751179304	.7819360011	.8429660513	10.093339275	-.0064996159	.8497770128

5.2.2 - TESTE 2 (EFEITO NA DISTÂNCIA DA IMAGEM ATÉ A LENTE)

Com o posicionamento dos 4 pontos em 4 planos distintos, ocorre diminuição da dependência entre eles, diminuindo efeitos de correlação. Comparando este teste, tabela 5.4, com aquele efetuado no item 5.1.2, percebe-se um sensível aumento nos erros que se pode

cometer e ainda se atingir resultados satisfatórios. Verifica-se que com um erro de 0,030mm que eventualmente possa se estar cometendo ainda se tem um nível de confiança menor que 0,5% ($\chi^2 = 0,207$) e, para um erro de 0,040mm, este nível passa a ser de 1% ($\chi^2 = 0,297$).

O maior problema ainda está no posicionamento do plano imagem para cada um dos pontos pois, a profundidade de foco é da ordem de 0,50mm, sem o uso de instrumento e da ordem de 0,10mm com o uso de instrumentos convencionais de observação.

TABELA 5.4 - EFEITO NA DISTÂNCIA DA IMAGEM ATÉ A LENTE

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.000	.0000000022	.9999994509	.9500000306	11.9998376479	-.0073333333	.9600006461
.001	.0000060510	.9998872657	.9499758415	11.9914885927	-.007333072	.9599747443
.002	.0000042035	.9998845429	.9499162815	12.0070784850	-.007332761	.9599156496
.003	.0000918512	.9960544611	.9479471755	12.0284084084	-.007317934	.9578923646
.004	.0005964165	.9815121869	.9407538454	12.0290684143	-.007263006	.9504558441
.005	.0032312392	.9541852969	.9272099019	12.0096021819	-.007159273	.9363632429
.010	.0080669776	.9276609661	.9139041744	11.9942432132	-.007057288	.9224316513
.020	.0239262941	.8760610208	.8874821885	11.9830832101	-.006854716	.8945761379
.030	.0887998641	.7641757895	.8275000005	11.9495749699	-.006394729	.8311317090
.040	.2772586389	.6269657416	.7485153715	11.2245208646	-.005788341	.7508120838
.050	5.535668982	.4928637820	.6711348817	4.1554730286	-.005187452	.7022544619

5.2.3 - TESTE 3 (EFEITO NA COTA DO OBJETO)

A cota do objeto necessitaria de um sistema mecânico preciso, para o posicionamento e para que as medidas fossem efetuadas. Não é difícil de se conseguir precisão de medida da ordem de 0,300mm, para que se tenha nível de significância de 0,5% ($\chi^2 = 0,207$) e, 0,400mm ao se desejar nível de significância de 1% ($\chi^2 = 0,297$), tabela 5.5.

TABELA 5.5 - EFEITO NA COTA DO OBJETO

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.000	.0000000022	.9999994509	.9500000306	11.999837647	-.0073333332	.9600006461
.001	.0000000960	.9998334959	.9499207156	11.999189002	-.0073327212	.9599188362
.002	.0000000320	.9998598382	.9499325592	11.999833454	-.0073328131	.9599284641
.003	.0000002701	1.0000786234	.9500356261	12.001771936	-.0073336092	.9600295959

continua

TABELA 5.5 - EFEITO NA COTA DO OBJETO

continuação

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.004	.0000024367	1.0004906729	.9502302787	12.005006766	-.0073351124	.9602226104
.005	.0000093384	1.0010970854	.9505169837	12.009541599	-.0073373263	.9605079925
.010	.0000158318	1.0012421328	.9505825664	12.012777036	-.0073378346	.9605629156
.020	.0000343567	1.0015565852	.9507254446	12.019254558	-.0073389416	.9606853196
.030	.0001471727	1.0038721476	.9518159180	12.038808402	-.0073473646	.9617601646
.040	.0005272231	1.0082630761	.9538859921	12.071662946	-.0073633505	.9638208322
.050	.0014850219	1.0148419873	.9569825601	12.118185642	-.0073872618	.9669160296
.060	.0034908521	1.0237637736	.9611685798	12.178904990	-.0074195847	.9711109742
.070	.0072090361	1.0352318677	.9665250308	12.254541826	-.0074609449	.9764893575
.080	.0135493295	1.0495076585	.9731539144	12.346060148	-.0075121303	.9831563448
.090	.0237441692	1.0669241672	.9811826338	12.454747038	-.0075741255	.9912429307
.100	.0394667024	1.0879052827	.9907700684	12.582336705	-.0076481585	1.0009119261
.200	.0513135654	1.1009590592	.9966765131	12.662318573	-.0076938066	1.0068839945
.300	.1030357365	1.1496974634	1.0184918622	12.921453059	-.0078623182	1.0290753683
.400	.2757949955	1.2455829876	1.0599270618	13.510207238	-.0081826991	1.0708595598
.500	1.142918515	1.3177259174	1.0871498894	15.471047657	-.0083983330	1.0925769467

5.2.4 - TESTE 4 (EFEITO NA COTA DA IMAGEM)

As cotas das imagens podem ser medidas com o uso de monocomparadores, os quais propiciariam precisão da ordem de 0,005mm, o que é suficiente para garantir que se tem condições de efetuar todas as medidas necessárias para a aplicação do método.

A tabela 5.6 apresenta resultados onde mesmo com erros de medida da ordem de 0,030mm, consegue-se nível de confiança de 0,5% ($\chi^2 = 0,207$). Tal erro dificilmente seria cometido por um operador experiente.

TABELA 5.6 - EFEITO NA COTA DA IMAGEM

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.000	.0000000022	.9999994509	.9500000306	11.9998376479	-.0073333332	.9600006461

continua

TABELA 5.6 - EFEITO NA COTA DA IMAGEM

continuação

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.001	.0000060510	.9998872657	.9499758415	11.9914885927	-.0073330721	.9599747443
.002	.0000975814	.9990707973	.9496487225	11.9659740960	-.0073303977	.9596763802
.003	.0005756554	.9965507505	.9485431040	11.9180569952	-.0073216389	.9586185768
.004	.0021872828	.9912504496	.9461428469	11.8419851802	-.0073028118	.9562727907
.005	.0062926813	.9825107846	.9421212735	11.7348155324	-.0072713959	.9523002186
.010	.0212872554	.9607229511	.9319232078	11.5216861863	-.0071919432	.9419870979
.020	.0743832849	.9149795742	.9100434784	11.1251093933	-.0070216543	.9195856260
.030	.1899265888	.8531629292	.8795535337	10.6239625687	-.0067843629	.8880484039
.040	.3751179304	.7819360011	.8429660513	10.0933392755	-.0064996159	.8497770128

5.3 - TESTE COM NOVO CONJUNTO DE PONTOS

Para os testes seguintes são utilizados os pontos do espaço objeto, item 4.2 (pág. 61) e com eles determina-se a matriz do sistema óptico mesma da lente utilizada neste item.

5.3.1 - TESTE 1 (EFEITO NA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE)

Esta lente propicia resultados melhores, se comparados com a dos testes anteriores pois agora, no posicionamento dos planos objeto, para que se tenha nível de confiança de 0,5% ($\chi^2 = 0,207$), pode-se ter erro de 0,050mm, tabela 5.7.

TABELA 5.7 - EFEITO NA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.000	.0000000001	.9999999754	.9645162103	19.3547857149	-.0044857529	.9467743300
.001	.0000007452	.9999961416	.9645254140	19.3510411779	-.0044857698	.9467783973
.002	.0000158459	.9999655025	.9645354630	19.3373272707	-.0044857642	.9468006599

continua

TABELA 5.7 - EFEITO NA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE continuação

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.003	.0000888831	.9998814055	.9645335320	19.3133660862	-.0044856764	.9468285602
.004	.0002989593	.9997080018	.9645023688	19.2787824701	-.0044854262	.9468452083
.005	.0007659207	.9994012153	.9644207532	19.2331132453	-.0044849148	.9468298326
.010	.0020811285	.9982716227	.9640009603	19.1543018144	-.0044827001	.9464810402
.020	.0072685008	.9945228679	.9624424540	18.9807323078	-.0044749268	.9450803810
.030	.0242468144	.9872725815	.9593246219	18.6727712752	-.0044596380	.9423283422
.040	.0660816992	.9764826740	.9546092474	18.2301923579	-.0044366614	.9381864732
.050	.1503279178	.9627426419	.9485552017	17.6596429022	-.0044072080	.9329060887
.060	.2985287510	.9465678720	.9413849494	16.9665754493	-.0043723196	.9267033448

5.3.2 - TESTE 2 (EFEITO NA DISTÂNCIA DA IMAGEM ATÉ A LENTE)

A melhoria que se obteve com o uso desta lente é verificada na tabela 5.8. Para posicionamento do plano imagem, de cada ponto, sem o uso de instrumento óptico de observação, a profundidade de foco, a qual é da ordem de 0,050mm, já não seria mais um problema, pois pode-se cometer erros da ordem de 0,070mm, com nível de confiança de 0,5% ($\chi^2 = 0,207$).

TABELA 5.8 - EFEITO NA DISTÂNCIA DA IMAGEM ATÉ A LENTE

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.000	.0000000001	.9999999754	.9645162103	19.354785714	-.0044857529	.9467743300
.001	.0000007452	.9999961416	.9645254140	19.351041177	-.0044857698	.9467783973
.002	.0000006648	.9999936161	.9645021011	19.358424890	-.0044857132	.9467654578
.003	.0000212100	.9998103863	.9643586679	19.375062619	-.0044851757	.9466496819
.004	.0000915121	.9990128802	.9638862999	19.396531332	-.0044831857	.9462263631
.005	.0002138351	.9970217910	.9628053973	19.416961727	-.0044784423	.9452211741
.010	.0003264899	.9945019531	.9614795477	19.428249417	-.0044725329	.9439706444
.020	.0005657074	.9881897593	.9582088847	19.436937749	-.0044578317	.9408628712

continua

TABELA 5.8 - EFEITO NA DISTÂNCIA DA IMAGEM ATÉ A LENTE continuação

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.030	.0016168933	.9700830411	.9488730724	19.422667100	-.0044156600	.9319677975
.040	.0051328670	.9422730637	.9344116424	19.365444178	-.0043503138	.9182540816
.050	.0136069686	.9085082842	.9166000081	19.237921068	-.0042699447	.9015529331
.060	.0331887973	.8716030857	.8968533668	18.967847178	-.0041809917	.8834205271
.070	.0877019627	.8344693263	.8768094804	18.417106713	-.0040908718	.8657836414
.080	.2777004888	.8007904615	.8588332820	17.305821522	-.0040102588	.8516084013
.090	1.1164905981	.7764511542	.8473269298	14.864407416	-.0039588379	.8469049550
.100	8.4319847512	.7769128158	.8572250223	6.630758809	-.0040014731	.8753594371

5.3.3 - TESTE 3 (EFEITO NA COTA DO OBJETO)

Para medir a cota do objeto têm-se uma boa margem de tolerância nos erros que se pode cometer, tabela 5.9, mantendo-se o nível de confiança de 0,5% ($\chi^2 = 0,207$).

TABELA 5.9 - EFEITO NA COTA DO OBJETO

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.000	.0000000001	.9999999754	.9645162103	19.3547857149	-.0044857529	.9467743300
.001	.0000000313	.9999272012	.9644809942	19.3541646854	-.0044855892	.9467396190
.002	.0000001500	1.0001447100	.9645857690	19.3563575459	-.0044860766	.9468423003
.003	.0000028308	1.0006528808	.9648306714	19.3613671373	-.0044872156	.9470825083
.004	.0000137720	1.0014527802	.9652161089	19.3692013588	-.0044890082	.9474606440
.005	.0000419457	1.0025461724	.9657427637	19.3798732357	-.0044914576	.9479773784
.010	.0000868214	1.0036436618	.9662706243	19.3909144006	-.0044939129	.9484947164
.020	.0002259938	1.0058540149	.9673328759	19.4131174395	-.0044988538	.9495358420
.030	.0007963463	1.0110490907	.9698265347	19.4640751030	-.0045104520	.9519819071
.040	.0024114872	1.0193426847	.9737949768	19.5446266860	-.0045289092	.9558755869
.050	.0060993407	1.0309350417	.9793154672	19.6562450545	-.0045545849	.9612929002
.060	.0134151748	1.0461384446	.9865093613	19.8012311429	-.0045880434	.9683532397
.070	.0266511041	1.0654292935	.9955632489	19.9831239304	-.0046301528	.9772401479

continua

TABELA 5.9 - EFEITO NA COTA DO OBJETO

continuação

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.080	.0492567778	1.0895631279	1.0067764634	20.2076377791	-.0046823051	.9882479771
.090	.0868538265	1.1198780595	1.0206883383	20.4852089722	-.0047470086	1.0019068100
.100	.1506471688	1.1593867621	1.0385412018	20.8403263615	-.0048300408	1.0194368156
.200	.2250947729	1.1956590014	1.0546488752	21.1696230494	-.0049049796	1.0352473310

5.3.4 - TESTE 4 (EFEITO NA COTA DA IMAGEM)

Neste teste, a exemplo do anterior, tem-se condições de efetuar medidas com precisão bem melhor do que aquela exigida para se aproximar do erro de 0,60mm, que é o maior erro, dentre os tabelados, para que se tenha nível de significância de 0,5% ($\chi^2 = 0,207$), tabela 5.10.

TABELA 5.10 - EFEITO NA COTA DA IMAGEM

erro (mm)	χ^2	determinante	a	b	c	d
.000	.0000000001	.9999999754	.9645162103	19.3547857149	-.0044857529	.9467743300
.001	.0000000313	.9999272012	.9644809942	19.3541646854	-.0044855892	.9467396190
.002	.0000000247	1.0000729290	.9645515120	19.3554081373	-.0044859170	.9468091257
.003	.0000009958	1.0004404070	.9647293152	19.3585413383	-.0044867436	.9469843828
.004	.0000055885	1.0010378910	.9650183441	19.3636288072	-.0044880873	.9472692828
.005	.0000183580	1.0018790163	.9654251009	19.3707780610	-.0044899783	.9476702473
.010	.0000369015	1.0026639556	.9658045449	19.3774381314	-.0044917422	.9480443044
.020	.0000957957	1.0042945168	.9665923193	19.3912449710	-.0044954045	.9488209328
.030	.0003977915	1.0087641631	.9687485137	19.4289928296	-.0045054287	.9509467206
.040	.0015730702	1.0174231867	.9729113989	19.5023618654	-.0045247827	.9550502116
.050	.0064594384	1.0349574207	.9812796540	19.6551382921	-.0045636926	.9632905438
.060	.1125386349	1.1359762992	1.0279910641	20.6434729876	-.0047809177	1.0090375189
.070	*****	274.25277569	13.748865052	1901.851690289	-.0646198789	11.0085704719

CAPÍTULO 6

O CAMPO DE PROVAS

O método fotogramétrico para a determinação da matriz do sistema óptico de um sistema óptico comprovou-se matematicamente eficiente. Agora surge a necessidade de que ele seja viável experimentalmente.

No capítulo 5 foi feita uma estimativa dos erros que podem ser cometidos nos processos de medição, para que os resultados obtidos sejam satisfatórios. Estes erros dependem das condições do campo de provas (laboratório de ensaios). Este capítulo apresenta uma proposta de montagem de um campo de testes, com base em equipamentos de medições de coordenadas, os quais tem as suas resoluções e precisões tiradas de catálogos técnicos.

O propósito deste capítulo não é mostrar montagens definitivas, mas sim da viabilidade da aplicação do método em uma situação não simulada. Uma montagem real, naturalmente, iria exigir o trabalho de toda uma equipe de especialistas, principalmente em mecânica, pois trata-se de situação à nível de calibração de equipamento.

6.1 - EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO POSSÍVEIS DE SEREM UTILIZADOS

Uma gama muito grande de equipamentos seriam necessários para que fosse possível montar um campo de provas para a execução prática deste trabalho. Há a necessidade da construção mecânica de peças auxiliares e outros equipamentos, feitos com alto grau de precisão, o que demandaria o uso de fresas, tornos, dentre outros, todos de grande qualidade além do trabalho de técnicos especializados.

Na parte de operação e medição seria necessário trabalhar-se com operadores experientes e dispor-se de medidores de coordenadas planas e tridimensionais, para as peças mecânicas bem como de um medidor de coordenadas na fotografia, como por exemplo um monocomparador. Também necessita-se de interferômetro à laser, para que seja possível medir pequenos deslocamentos lineares.

Na seqüência, serão apresentadas descrições sucintas de equipamentos de medição e depois de cada um dos equipamentos a serem utilizados no campo de provas. Com o conhecimento da função de cada um deles, é feita a maneira de utilização de todos os equipamentos.

6.1.1 - INTERFERÔMETRO À LASER

Segundo Pedro Luis FAGGION(1993), o distanciômetro à laser, que faz medições baseando-se em processos interferométricos, é capaz de efetuar medidas de deslocamentos com precisão muito grande, chegando a ordem de grandeza de 0,001mm . O equipamento consiste basicamente em um emissor/receptor-laser e de um refletor . Este faz com que o feixe luminoso retorne para o aparelho e com isso os deslocamentos do refletor são determinados. Estando o refletor fixo em uma peça, ter-se-á registrado os deslocamentos desta peça.

Como é necessário que o refletor esteja alinhado com a direção do deslocamento que se deseje registrar e com o feixe laser, é necessário dispor todo o sistema em trilhos. O departamento de Geociências da Universidade Federal do Paraná dispõe deste equipamento instalado. A fig. 6.1 apresenta uma esquematização do sistema.

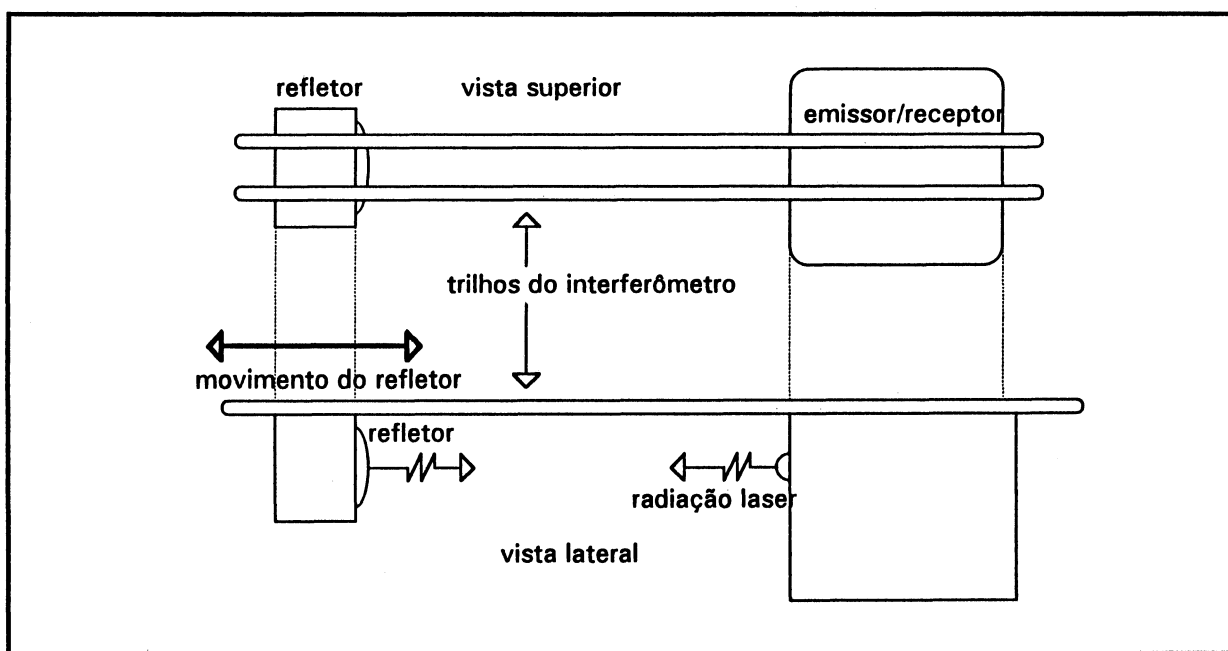


fig. 6.1

6.1.2 - MEDIDORES DE COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS

São equipamentos destinados à medição de coordenadas tridimensionais de peças mecânicas. O grau de precisão das medidas é altíssimo, em alguns casos ultrapassando até os processos fotogramétricos. Dois destes equipamentos são descritos a seguir para que seja

possível uma avaliação do grau de precisão que se pode obter para construir um campo de provas. Outros equipamentos similares poderiam ser utilizados. Os departamentos especializados, bem como as empresas que os comercializam ou utilizam poderiam ser consultados para a procura de catálogos.

6.1.2.1 - MEDIDOR PARA PEÇAS COM TAMANHO ATÉ 0,46x0,28x0,355m

Trata-se de uma máquina universal para medição de coordenadas, Moore M-18 5-Axis (anexo 13). As suas características principais são apresentadas na tabela 6.1.

TABELA 6.1 - CARACTERÍSTICAS DO MEDIDOR MOORE M-18 5-AXIS CNC

	eixo x	eixo y	eixo z
Resolução	0,01 μ m	0,01 μ m	0,01 μ m
Faixa de medição	460mm	280mm	355mm
Acuracidade de posicionamento	0,06 μ m	0,06 μ m	0,06 μ m

6.1.2.2 - MEDIDOR PARA PEÇAS COM TAMANHO ATÉ 3x2x1m

O medidor Leitz PMM CNC Multi Coordinate difere do modelo anterior no que diz respeito ao alcance das peças que podem ser medidas (anexo 14). A sua resolução é menor que o Moore. Desejando-se montar um campo de provas com peças grandes, este equipamento permitiria medir as coordenadas dos pontos de apoio nelas materializados. A tabela 6.2 fornece as características do equipamento.

TABELA 6.2 - CARACTERÍSTICAS DO MEDIDOR LEITZ PMM CNC

	eixo x	eixo y	eixo z
Resolução	0,1 μ m	0,1 μ m	0,1 μ m
Faixa de medição	3.000mm	2.000mm	1.000mm
Acuracidade de posicionamento¹	2 μ m	2 μ m	2 μ m

¹ A incerteza da medição das distâncias L, paralelas aos eixos do instrumento é dada por

$$U = 2,0 + \frac{1}{250} * \frac{L}{\text{mm}} [\mu\text{m}].$$

6.1.3 - APARELHO DE MEDIÇÃO DE COORDENADAS PLANAS (MONOCOMPARADOR)

Para as medições a serem efetuadas no negativo fotográfico, sugere-se que sejam usados medidores de fotocoordenadas, monocomparadores, pois os mesmos possuem alta resolução, aproximadamente 0,001mm, podendo-se ter precisão de medidas da ordem de 0,004 ou 0,005mm, o que de acordo com o item 5.3.4, satisfaz plenamente.

Como exemplos de equipamentos que poderiam ser utilizados, cita-se o Kern MK2 e o Planicomp C 100, que são amplamente usados em medições fotogramétricas.

6.2 - EQUIPAMENTOS A SEREM CONSTRUÍDOS

Muitas serão as possibilidades de montagem do campo de provas. A criatividade dos membros da equipe, a disponibilidade de material e de equipamento é que serão os elementos definidores do caminho a seguir.

Os equipamentos ora propostos, visam apenas mostrar a viabilidade de montagem do campo de provas, levando em conta a precisão necessária de ser alcançada quando do processo de medição e a precisão que pode ser atingida pelos equipamentos de medição.

Em todas as peças propostas não se leva em conta as dimensões nem as escalas. As dimensões devem ser objeto de um estudo específico quando da construção das mesmas.

6.2.1 - ALVO (ESPAÇO OBJETO)

A construção do alvo exigiria um delicado e preciso serviço de mecânica. A fig. 6.2 apresenta o formato do alvo. Nele materializam-se os pontos do espaço objeto. Uma grande quantidade de pontos ficam nele registrados. Desejando efetuar o processamento com um número maior de pontos, basta aumentar o número de medições e dimensionar o programa computacional, adequando-o à situação desejada.

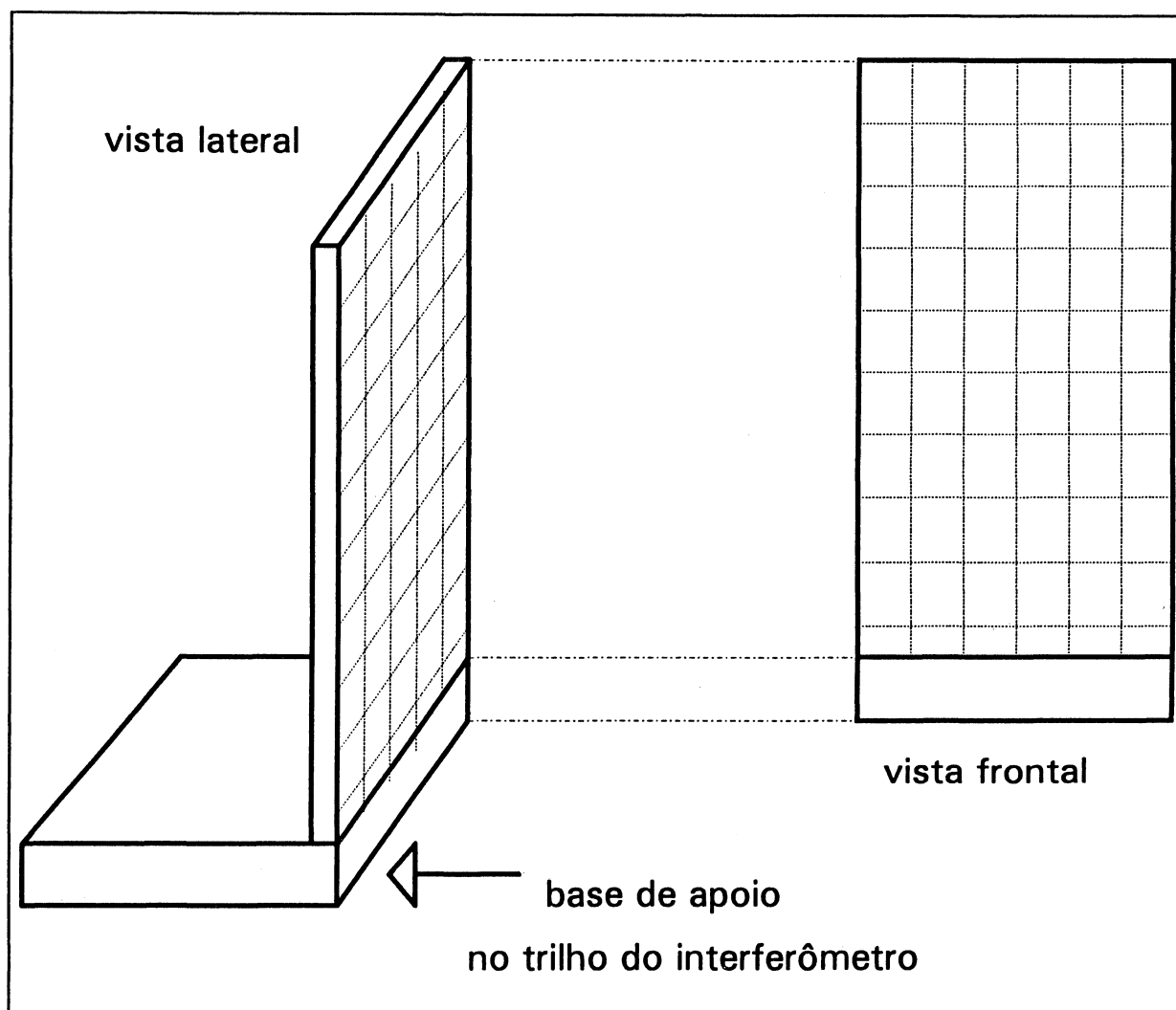


fig. 6.2

Trata-se de uma peça de aço com uma base que permita o seu deslocamento nos trilhos do interferômetro à laser. A placa quadriculada, materializa os pontos de um sistema de coordenadas solidário à placa, a qual deve ter as coordenadas de cada ponto medida com grande precisão, por meio dos equipamentos descritos anteriormente. O ideal é que se disponha de um "certificado de calibração" da placa.

Considerando os eixos x e y como sendo aqueles paralelos à placa. Como a cota do objeto é função dessas coordenadas, de acordo com o item 5.2.3, para que se tenha nível de significância de 0,5%, necessita-se de precisão de medida na ordem de 0,300mm, o que facilmente é atingido pelos equipamentos descritos nas tabelas 6.1 e 6.2.

6.2.2 - CARRO DE MEDIÇÃO DA DISTÂNCIA DO OBJETO ATÉ A LENTE

Para medir esta distância, será necessário construir uma outra peça auxiliar, móvel, cujas dimensões devem ser também conhecidas com grande precisão. Esta peça é apresentada na figura 6.3.

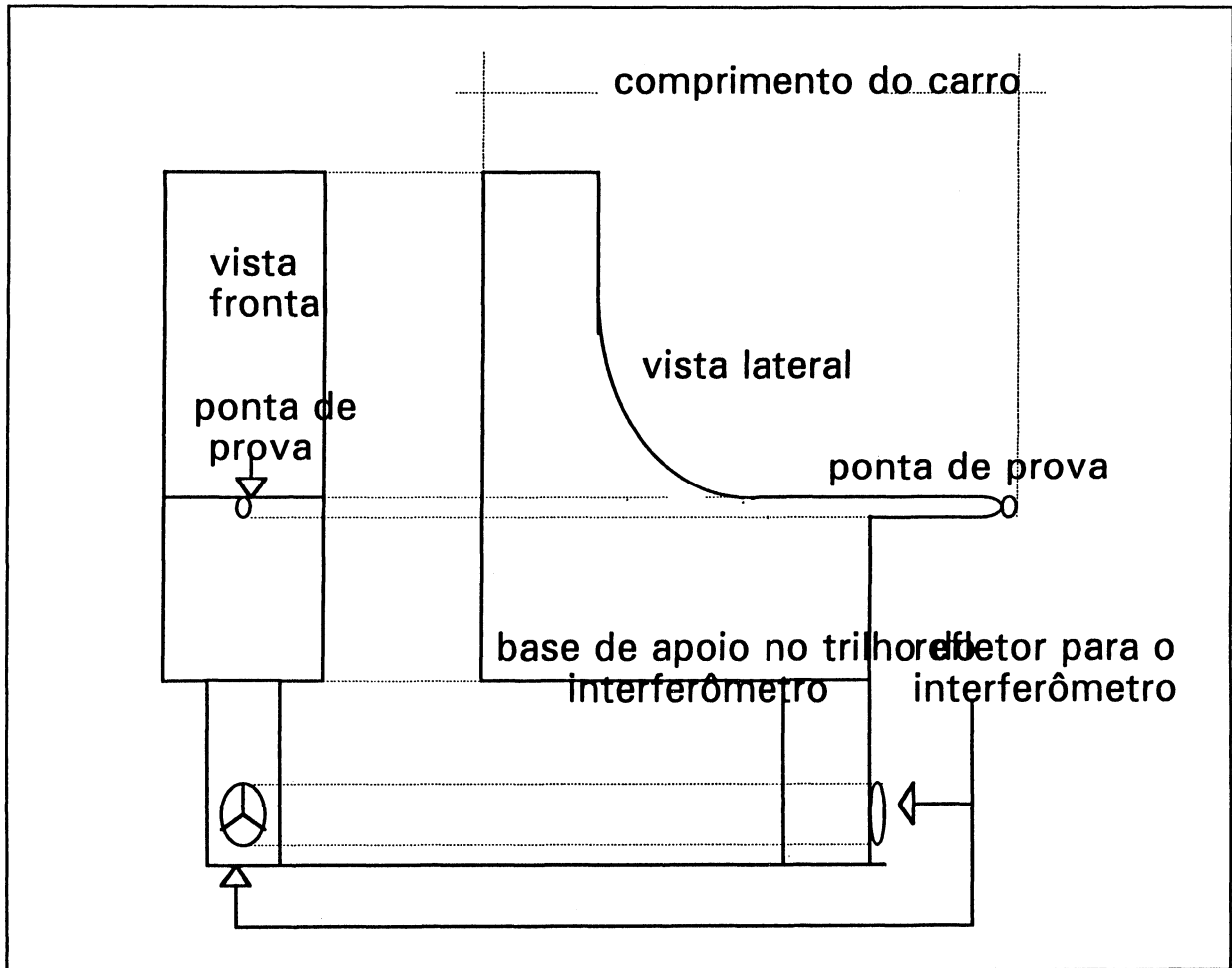


fig.6.3

Têm-se duas vistas, a primeira é a frontal e a segunda é a lateral. A função desta peça é ser encostada, pelo plano vertical no seu fundo, na placa do alvo. Após isso ela é deslocada para frente até que a ponta de prova encoste na lente. Durante o seu movimento o interferômetro registrou o seu deslocamento com grande precisão. Como o comprimento do carro é conhecido, ao adicionar-se essas duas distâncias, têm-se a distância da lente até o objeto.

O item 5.3.1 aponta que esta distância deve ser medida com precisão de 0,050mm, precisão esta que facilmente é atingida tanto pelo interferômetro como pelos medidores de coordenadas.

6.2.3 - CARRO DE MEDIÇÃO DA DISTÂNCIA DA LENTE ATÉ A IMAGEM

Este carro tem a função de permitir que se calcule a distância da lente da objetiva até a película fotográfica, onde se formará a imagem. A observação da fig. 6.4 permite que se tenha uma idéia da sua função. A peça deve ser apoiada nos trilhos do distanciômetro eletrônico, encosta-se a ponta de prova na lente e afasta-se a peça. O seu deslocamento é registrado pelo interferômetro.

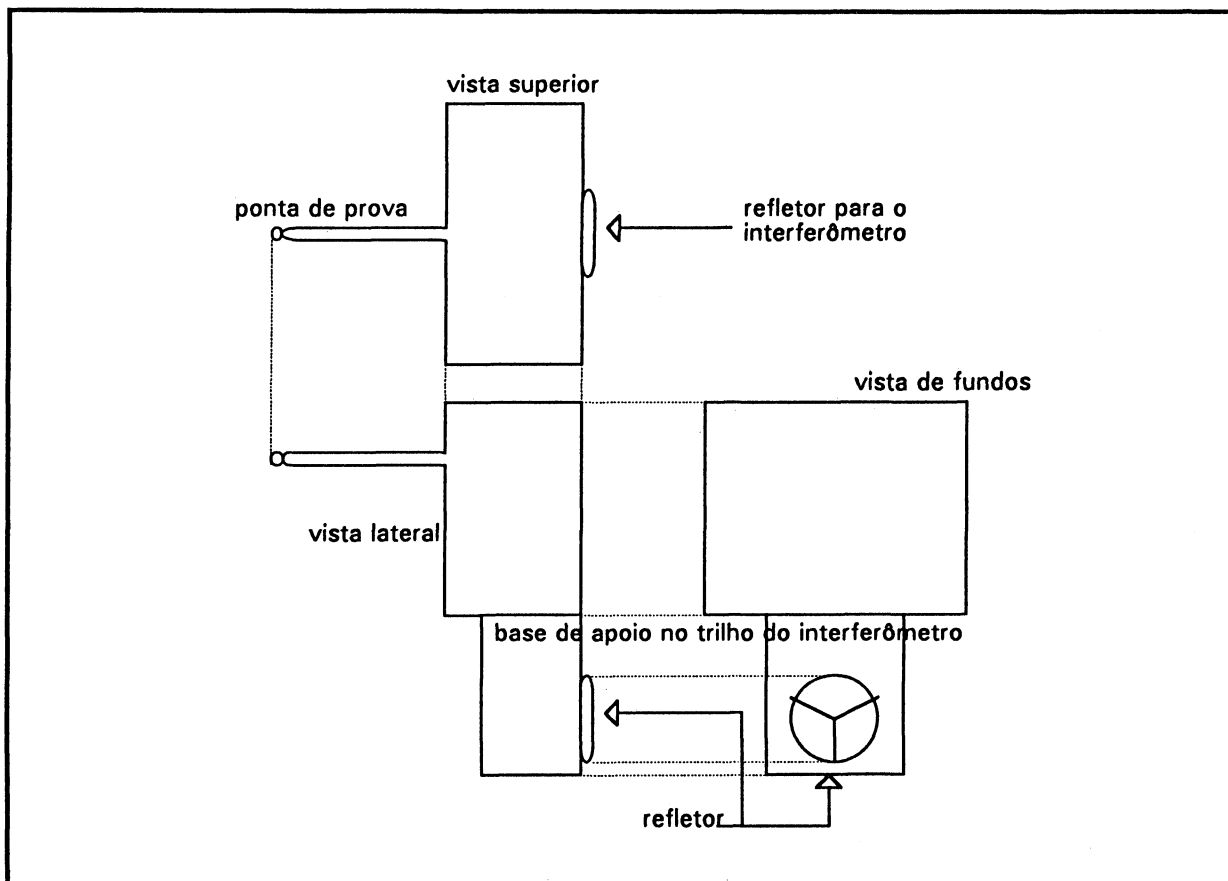


fig. 6.4

6.2.4 - CÂMARA PARA A FIXAÇÃO DA OBJETIVA E TOMADA DAS FOTOS

É a parte mais delicada de todo o processo, pois trata-se, praticamente de uma câmara métrica fig. 6.5. Ela deverá permitir que as objetivas sejam intercambiáveis, e que seja possível, por meio de suportes especiais, que vários tipos de objetivas possam ser acoplados a ela. É necessário que haja um rígido sistema de fixação da câmara nos trilhos do interferômetro.

Também necessita-se que ela seja suficientemente rígida para que seja possível a abertura da câmara, por rotação do magazine, sem que o seu corpo tenha qualquer tipo de movimento. A distância da parte posterior do magazine, até a película fotográfica, precisa ser conhecida com precisão de, na pior das hipóteses, 0,070mm, conforme analisado em 5.3.2. Precisão esta que, da mesma forma dos casos citados anteriormente, facilmente é atingida pelos equipamentos de medição citados.

A câmara deverá ser estável e o magazine deverá dispor de sistema de planificação da película fotográfica e sistema de registro das marcas fiduciais.

A proposta desta câmara sugere que a focalização seja feita por meio da movimentação do magazine, mantendo-se a posição da objetiva constante em relação ao trilho do interferômetro. Poderia ter sido sugerida uma outra possibilidade onde o magazine é mantido fixo e a objetiva é movimentada.

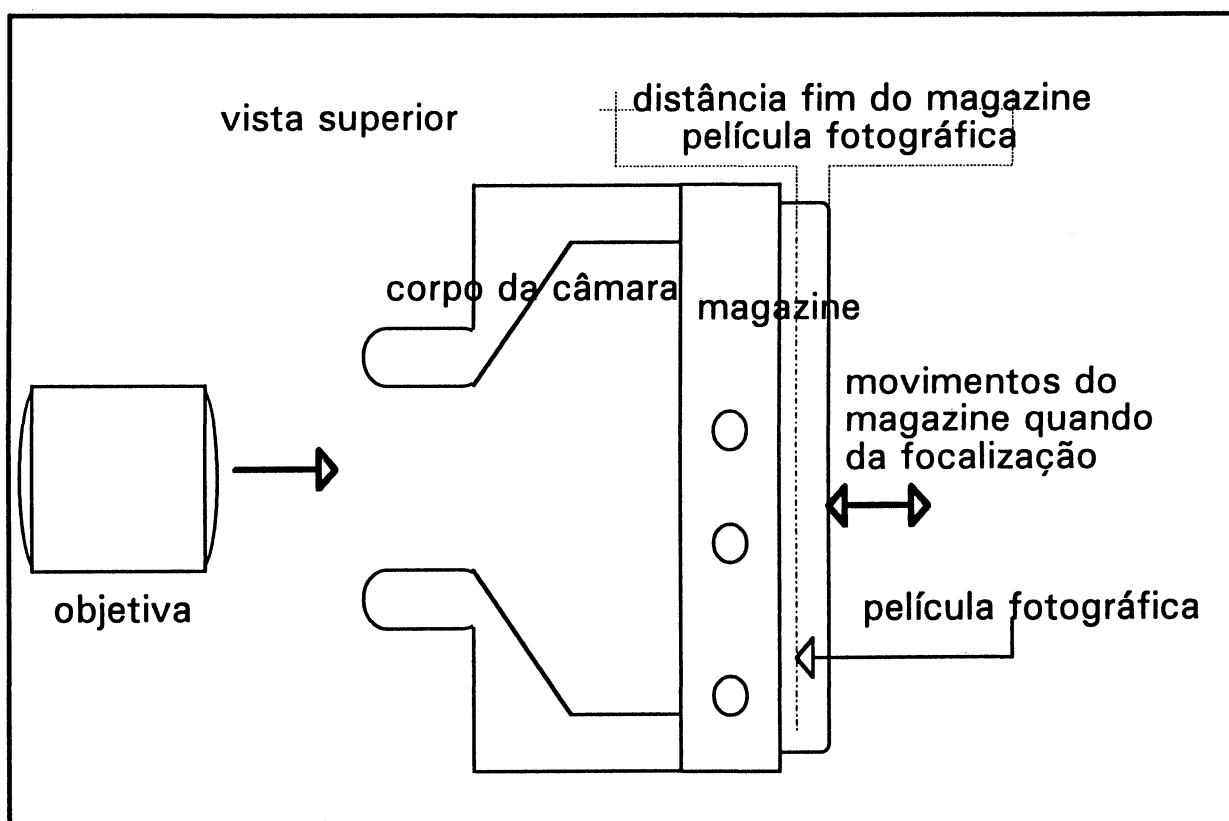


fig. 6.5

A fig. 6.6 mostra como o magazine deve ser aberto e qual deve ser o posicionamento do carro de medição para que se possa efetuar as medições desejadas.

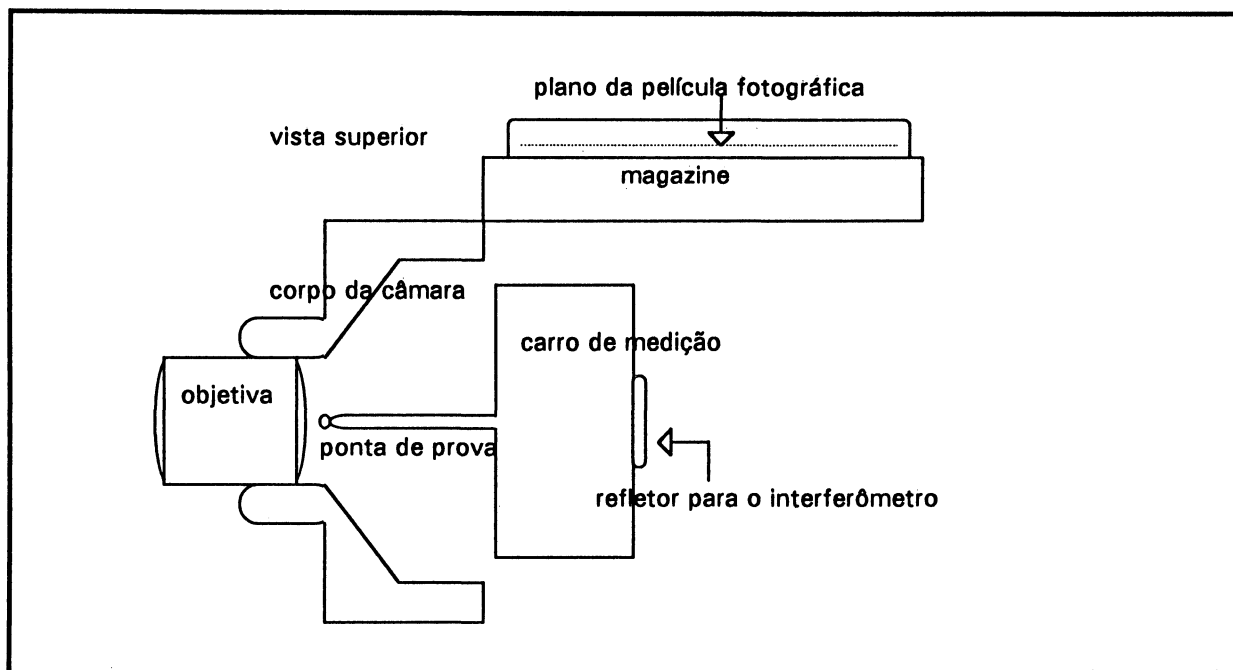


fig. 6.6

6.3 - SEQUÊNCIA DAS OPERAÇÕES PARA AS MEDIÇÕES

6.3.1 - ESPAÇO OBJETO

A primeira operação a ser efetuada é a fixação do alvo no trilho do interferômetro. Após isso coloca-se a câmera no trilho, com a objetiva e, dispõe-se o carro de medição da distância objeto alvo entre o alvo e a câmera, ambos devem estar firmemente presos ao trilho, conforme a fig.6.7.

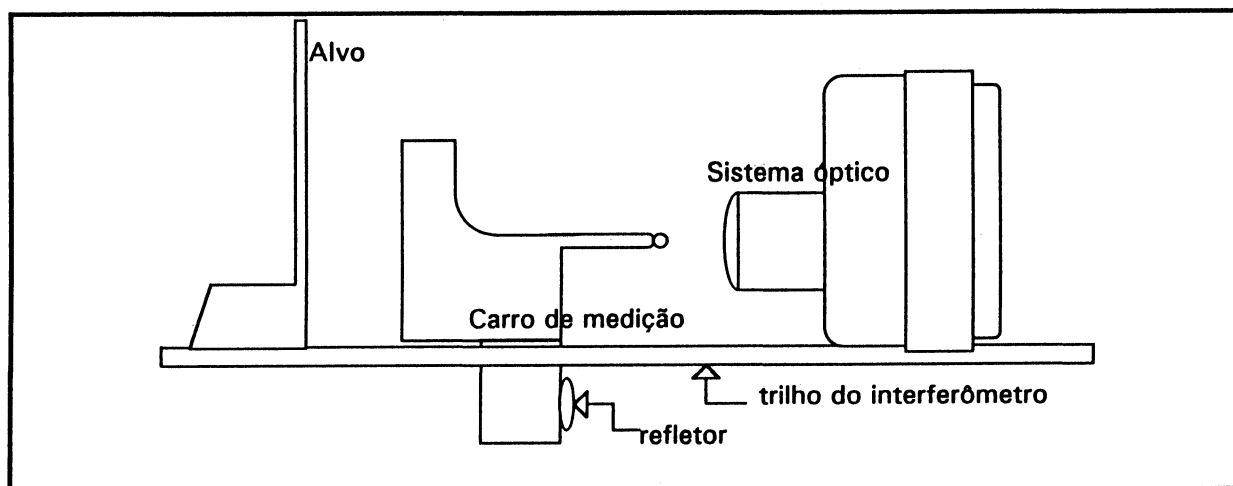


fig. 6.7

O carro de medição é deslocado até encostar no alvo. Agora é verificado o alinhamento vertical do alvo, conforme indicado na figura 6.8. Inicia-se a leitura no interferômetro.

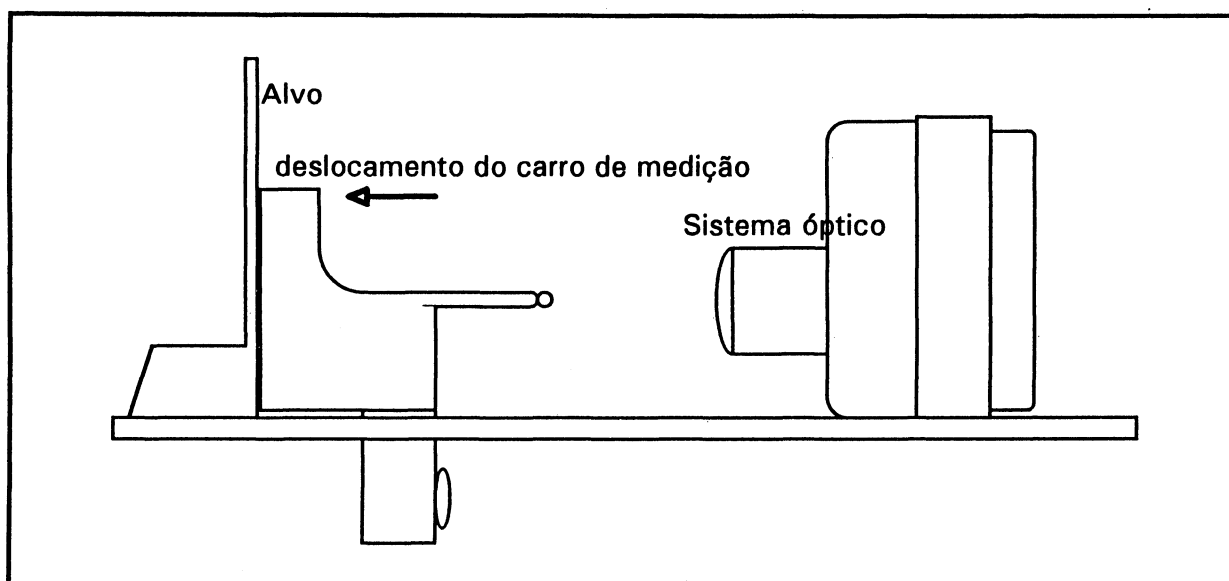


fig. 6.8

O carro é deslocado para o outro lado até que a ponta de prova encoste na lente, figura 6.9. O interferômetro registra o deslocamento do carro. A distância do objeto até a lente é dada pela soma do comprimento do carro com o deslocamento sofrido pelo mesmo.

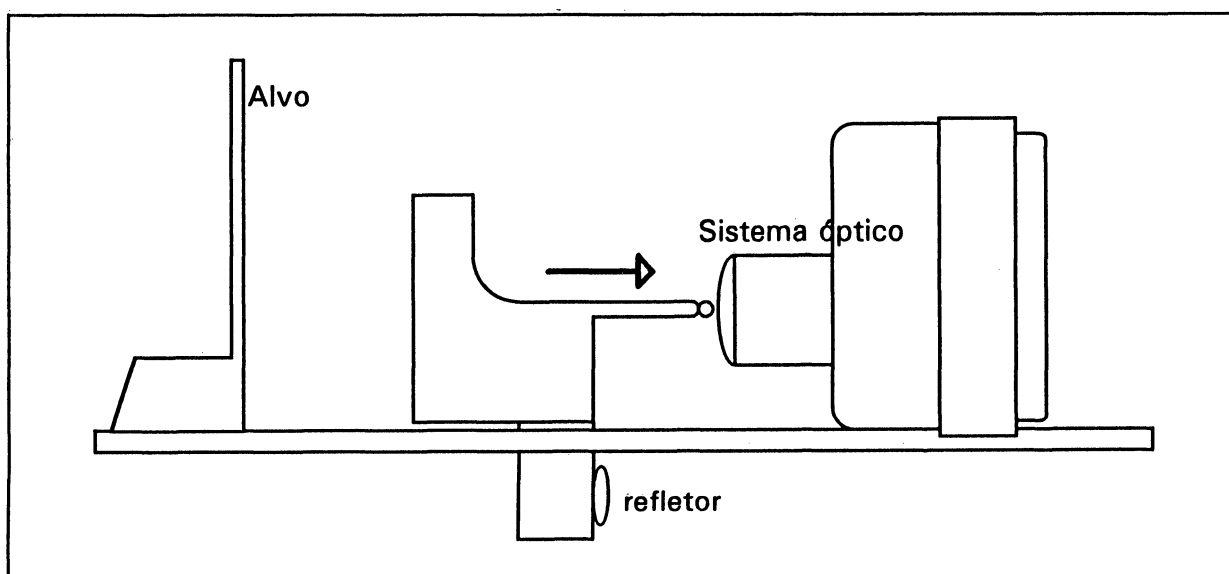


fig. 6.9

Registra-se o valor da distância objeto lente, retira-se o carro de medição e o espaço objeto está preparado para as tomadas das fotos.

Como foi verificado capítulo 5, item 5.2, se cada um dos pontos estiver posicionado em um plano diferente, isto é, cada plano a uma distância da lente diferente da dos demais, há quebra de correlação e melhora a qualidade dos resultados obtidos, com isso, a operação de medição da distância do objeto até a lente deve ser repetida quatro vezes, sempre com a tomada da foto entre elas e, em cada uma delas, é mudada a posição do alvo, sempre mantendo fixa a posição da câmara.

6.3.2 - ESPAÇO IMAGEM

Com o magazine aberto, encosta-se a ponta de prova na lente , pelo lado interno da câmara. Registra-se a leitura no interferômetro (fig.6.10).

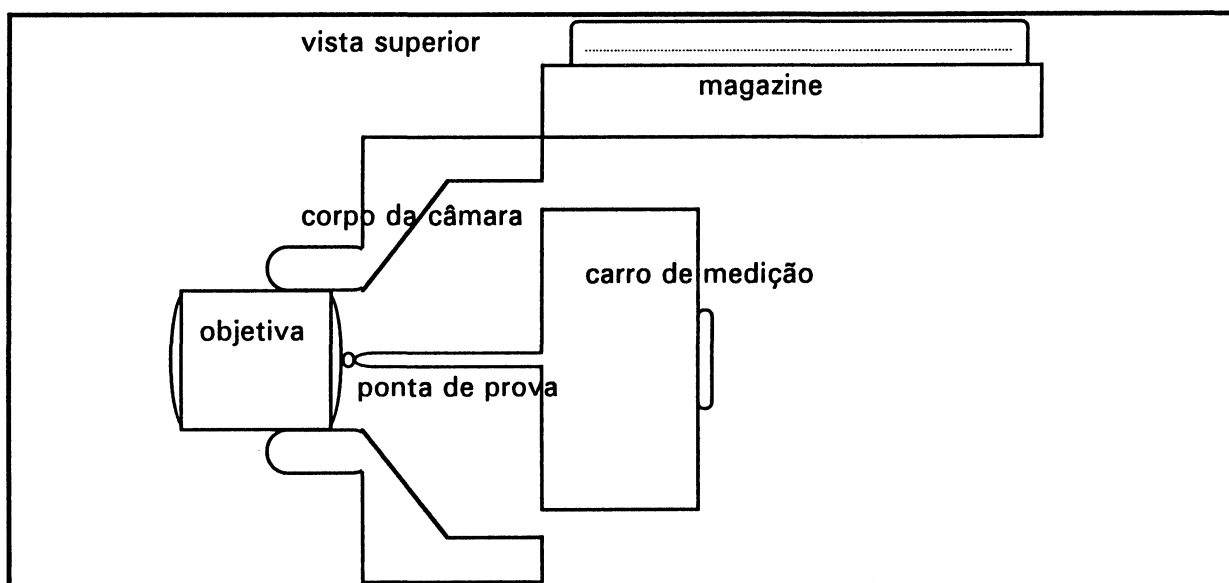


fig. 6.10

Com os dados coletados, desloca-se o carro de medição do espaço imagem para fora da câmara, de maneira que seja possível fechar o magazine. registra-se a leitura efetuada no aparelho de medição dos deslocamentos do carro de medição. O magazine é então fechado e efetua-se a focalização da imagem (fig. 6.11).

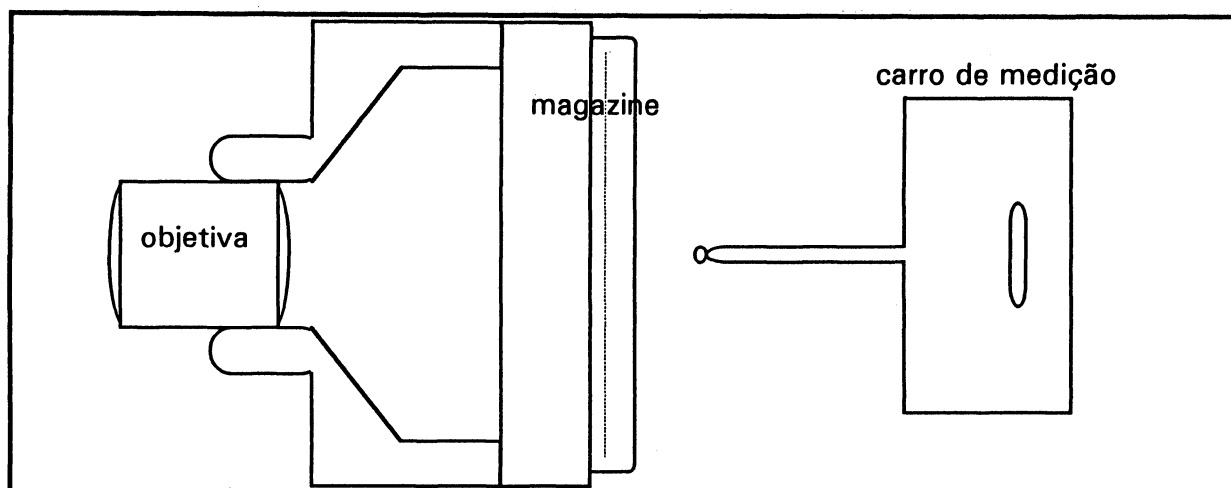


fig. 6.11

Após este procedimento, o carro de medição é novamente aproximado da câmara até que a ponta de prova encoste no magazine. Registra-se a nova leitura e têm-se condições de saber qual o deslocamento sofrido pelo carro desde o instante em que estava com a ponta de prova encostada na lente e o instante em que a ponta de prova está em contato com a parte posterior do magazine. Como é conhecida a distância da película fotográfica até a parte posterior do magazine, é possível determinar a distância da lente até a película, isto é, até a imagem (fig. 6.12). Efetua-se a tomada da fotografia com o disparo do obturador da câmara.

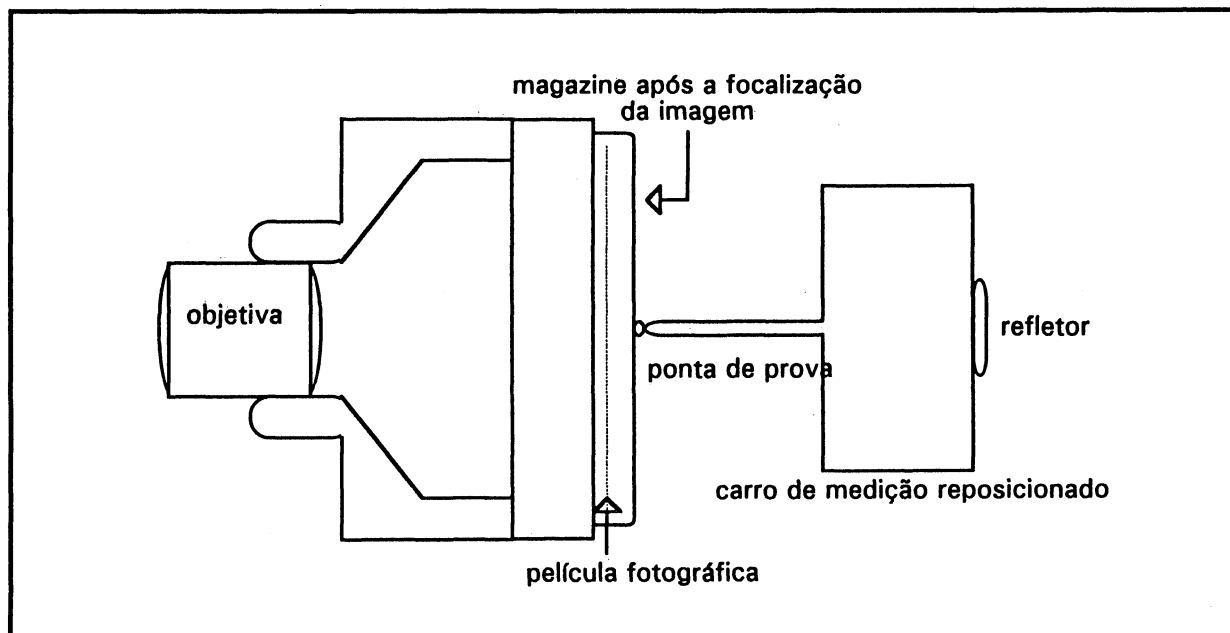


fig. 6.12

O processo deve ser repetido para cada posição do plano objeto. Segundo o proposto neste trabalho, serão necessárias quatro tomadas de fotografias.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 - CONCLUSÕES

A determinação da matriz de um sistema óptico não é utilizado em fotogrametria, haja vista que na literatura especializada tal assunto não é abordado. Devido ao fato de que todos os elementos geométricos e físicos da lente participam do cálculo dos elementos desta matriz, visualiza-se que ela possui informações importantes a respeito dos sistema ópticos.

Quando se trata de análise da qualidade de um sistema óptico, Quando é feito um estudo da matriz do sistema óptico, automaticamente, está se fazendo um estudo de todos os elementos físicos e geométricos de cada lente constituinte do sistema óptico.

Para sistemas ópticos complexos, como a objetiva de uma câmara fotográfica métrica, a determinação da matriz do sistema óptico por métodos tradicionais é puramente matemática, devido a ser feita pela técnica *ray tracing*, isto é, cada elemento é considerado isoladamente a medida que o raio luminoso transmite-se e refrata-se em cada meio. O processo fotogramétrico proposto neste trabalho, considera o sistema óptico como um todo, tratando o sistema óptico como um sistema real, portanto sujeito à imperfeições, tais como irregularidades geométricas e físicas na construção de cada lente, no posicionamento de cada uma delas no sistema óptico e os desalinhamentos que provavelmente existem com relação ao eixo óptico. Por isso, a determinação desta matriz, com adequada análise, é importante para o fotogrametrista.

O método é viável, não obstante estar na dependência do uso de sofisticados equipamentos, tanto para os processos de medição quanto para a tomada das fotografias, o que demanda na construção de equipamentos específicos, porém, é necessário um estudo de viabilidade econômica.

Face ao exposto neste trabalho, conclui-se que é possível determinar a matriz do sistema óptico de uma objetiva de uma máquina fotográfica experimentalmente, por meio de um processo fotogramétrico.

7.2 - RECOMENDAÇÕES

A primeira das recomendações, obviamente, é que sejam feitas determinações experimentais da matriz do sistema óptico de objetivas de câmaras fotográficas, portanto há necessidade de que sejam projetados e construídos os equipamentos descritos neste trabalho, ou similares.

Também sugere-se que, no caso de trabalhos a nível de calibração, que o número de pontos a serem considerados não se limite a 4, como foi utilizado no processo de ajustamento, mas sim de muito mais, o que fará com que os resultados finais sejam mais confiáveis.

Recomenda-se um aprofundado estudo sobre a influência da disposição dos pontos do espaço objeto na determinação da matriz do sistema óptico.

Que se estude a fundo todo o processo, procurando verificar e relacionar a influência que, individualmente, cada um dos elementos físicos e geométricos do sistema óptico produzem sobre a matriz do sistema óptico, no qual procura-se interpretar cada um dos elementos da matriz do sistema como sendo portador de informações deste sistema e, buscar o inter-relacionamento entre os parâmetros que neste trabalho são considerados.

Procurar novos parâmetros de avaliação da qualidade de objetivas de câmaras métricas, por meio das matrizes dos seus sistemas ópticos.

Devido às características das câmaras métricas, naturalmente que o campo de provas proposto se aproxima mais da situação de condição normal de operação de uma câmara terrestre do que de uma câmara aérea. Por isso deve-se desenvolver um método para que seja possível determinar a matriz do sistema óptico de uma câmara aérea, baseando-se em um campo de provas que reproduza situações semelhantes a de um campo natural de operação.

Por entender que a determinação da matriz do sistema óptico é um processo fácil de ser executado, sugere-se que sistematicamente sejam feitas estas determinações, visando procurar avaliar a estabilidade da objetiva da câmara. Mesmo para câmara aérea, entende-se que se houver instabilidade da objetiva, poderia ser detectado pelo processo de laboratório.

Toda uma teoria de relacionamento das distorções e aberrações provocadas por sistemas ópticos deve ser desenvolvida, por meio de modelos que relacionem a teoria atual existente com os efeitos que eles produzem na matriz do sistema óptico.

ANEXO 1

```

C      SISTEMA.FOR
C      DETERMINACAO DA MATRIZ DE UM SISTEMA OPTICO SIMULADO
C      Este programa determina a matriz de um sistema optico
C      composto por uma unica lente.
C      O arquivo LENTE.DAT fornece os valores do rai o de
C      curvatura do primeiro diopetro, do raio de curvatura do
C      segundo diopetro, da espessura da lente e o indice de
C      refracao do material da lente.
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION SS(2,2),REF1(2,2),TRANS(2,2),REF2(2,2)
      DIMENSION AUX(2,2),Y(2),YL(2)
      OPEN(UNIT=22,FILE='LENTE.DAT')
      OPEN(UNIT=21,FILE='RELAT.DAT',STATUS='NEW')
      OPEN(UNIT=23,FILE='SISTQUI.DAT',STATUS='NEW')
      OPEN(UNIT=24,FILE='SISTEMA.DAT',STATUS='NEW')
C      LEITURA DOS DADOS DA LENTE NO ARQUIVO SYSTEM.DAT
      READ(22,*)RAIO1,RAIO2,ESP,REFRAC
      WRITE(21,*)'RELAT.DAT ( RELATORIO DO SISTEMA.FOR ) '
      WRITE(21,*)' '
      WRITE(21,5)RAIO1
5      FORMAT(' ',1X,'RAIO DE CURVATURA DA PRIMEIRA FACE (mm)
      *=' ,F9.3)
      WRITE(21,6)RAIO2
      WRITE(21,7)ESP
      WRITE(21,8)REFRAC
6      FORMAT(' ',1X,'RAIO DE CURVATURA DA SEGUNDA FACE (mm)
      *=' ,F9.3)
7      FORMAT(' ',1X,'ESPESSURA DA LENTE (mm) =' ,F9.3)
8      FORMAT(' ',1X,'INDICE DE REFRACAO =' ,F7.4)
      DO 10 I=1,2
          DO 10 J=1,2
              SS(I,J)=0.D0
              REF1(I,J)=0.D0
              REF2(I,J)=0.D0
              TRANS(I,J)=0.D0
              AUX(I,J)=0.D0
              Y(I)=0.D0
              YL(I)=0.D0
10     CONTINUE
C      DISTANCIA FOCAL DA LENTE
      FOCAL=(REFRAC-1.D0)*((1.D0/RAIO1)-(1.D0/RAIO2))
      FOCAL=1.D0/FOCAL
      WRITE(*,11)FOCAL
      WRITE(21,11)FOCAL
11     FORMAT(' ',1X,'DISTANCIA FOCAL DA LENTE:  f = ' ,F12.6,/)
C      MONTAGEM DOS ELEMENTOS DAS MATRIZES DE REFRACAO
      RR=1.D0/REFRAC
C      MATRIZ DE REFRACAO NO PRIMEIRO DIOPTRO
      REF1(1,1)=1.D0
      REF1(2,1)=(RR-1.D0)*(1.D0/RAIO1)
      REF1(2,2)=RR
      WRITE(21,*)'PRIMEIRA REFRACAO'
      WRITE(21,20)((REF1(I,J),J=1,2),I=1,2)

```

```

C      MATRIZ DE REFRACAO NO SEGUNDO DIOPTRO
      REF2(1,1)=1.D0
      REF2(2,1)=(REFRAC-1.D0)*(1.D0/RAIO2)
      REF2(2,2)=REFRAC
      WRITE(21,*)'SEGUNDA REFRACAO'
      WRITE(21,20)((REF2(I,J),J=1,2),I=1,2)
C      MONTAGEM DOS ELEMENTOS DA MATRIZ DE TRANSMISSAO
      TRANS(1,1)=1.D0
      TRANS(1,2)=ESP
      TRANS(2,2)=1.D0
      WRITE(21,*)'TRANSMISSAO'
      WRITE(21,20)((TRANS(I,J),J=1,2),I=1,2)
C      MATRIZ DO SISTEMA OPTICO
      CALL MULTIP(TRANS,REF1,AUX,2,2,2)
      CALL MULTIP(REF2,AUX,SS,2,2,2)
      WRITE(*,*)' MATRIZ DO SISTEMA OPTICO'
      WRITE(21,*)'MATRIZ DO SISTEMA OPTICO'
      WRITE(*,20)((SS(I,J),J=1,2),I=1,2)
      WRITE(21,20)((SS(I,J),J=1,2),I=1,2)
      WRITE(24,*)SS(1,1),SS(1,2),SS(2,1),SS(2,2)
20     FORMAT(' ',4X,F15.8,3X,F15.8,/,5X,F15.8,3X,F15.8/)
C      DETERMINANTE DA MATRIZ DO SISTEMA OPTICO
      DELTA=SS(1,1)*SS(2,2)-SS(1,2)*SS(2,1)
      WRITE(*,*)'DETERMINANTE DA MATRIZ DO SISTEMA OPTICO'
      WRITE(*,24)DELTA
      WRITE(23,*)SS(1,1),SS(1,2),SS(2,1),SS(2,2),DELTA
24     FORMAT(' ',/,1X,'DELTA = ',F19.15,/)
      WRITE(21,*)'DETERMINANTE DA MATRIZ DO SISTEMA OPTICO'
      WRITE(21,24)DELTA
100    STOP
      END
      SUBROUTINE MULTIP(A,B,C,I,J,K)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(I,J),B(J,K),C(I,K)
      DO 1 N=1,I
      DO 1 L=1,K
      C(N,L)=0.D0
      DO 1 M=1,J
      C(N,L)=C(N,L)+A(N,M)*B(M,L)
1      CONTINUE
      RETURN
      END

```

ANEXO 2

```

C      PONTOS.FOR
C      CALCULO DA POSICAO DE OBJETOS E IMAGENS
C      Este programa determima a distancia da imagem ate a
C      lente, a cota da imagem e a direcao de cada raio que forma
C      a imagem.
C      O arquivo SISTEMA.DAT , gerado pelo programa
C      SISTEMA.FOR, fornece os elementos " a, b, c & d ", da
C      matriz do sistema optico. O arquivo PTOBJ.DAT fornece a
C      distancia do objeto ate a lente, a cota do objeto e a
C      direcao do raio luminoso que parte do objeto, para cada um
C      dos quatro pontos.
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION SS(2,2),REF1(2,2),TRANS(2,2),REF2(2,2)
      DIMENSION AUX(2,2),Y(2),YL(2)
      OPEN(UNIT=20,FILE='SISTEMA.DAT')
      OPEN(UNIT=21,FILE='PTOBJ.DAT')
      OPEN(UNIT=24,FILE='PONTOS.DAT',STATUS='NEW')
      READ(20,*)SS(1,1),SS(1,2),SS(2,1),SS(2,2)
      NNN=1
17      WRITE(*,*)'          MATRIZ DO SISTEMA OPTICO'
      WRITE(*,20)((SS(I,J),J=1,2),I=1,2)
20      FORMAT(' ',/,10X,'A = ',F14.6,8X,'B = ',F14.6,/,10X,'C = ',
1F14.6,8X,'D = ',F14.6,/)
C      DETERMINANTE DA MATRIZ DO SISTEMA OPTICO
      DELTA=SS(1,1)*SS(2,2)-SS(1,2)*SS(2,1)
      WRITE(*,*)'          DETERMINANTE DA MATRIZ DO SISTEMA OPTICO'
      WRITE(*,24)DELTA
24      FORMAT(' ',/,10X,'DELTA = ',F19.15,/)
99      READ(21,*)S1,YY,TETA
C      CALCULO DA DISTANCIA DA LENTE ATE A IMAGEM ( S2 )
      XNUM=SS(1,1)*S1+SS(1,2)
      DEN=SS(2,1)*S1+SS(2,2)
      S2=-XNUM/DEN
      YYL=(SS(1,1)+SS(2,1)*S2)*YY
      TETAL=SS(2,1)*YY+SS(2,1)*S2*TETA+SS(2,2)*TETA
      WRITE(24,29)NNN,YY,YYL,S1,S2
      WRITE(*,29)NNN,YY,YYL,S1,S2
      NNN=NNN+1
29      FORMAT('
* ',I2,' ',',',1X,F12.5,' ',',',1X,F12.5,' ',',',1X,F12.5,' ',',',1X,F12.5)
      IF(NNN.EQ.5)GO TO 100
      GO TO 99
100     STOP
      END

```

ANEXO 3

```

C      MATRIZ.FOR

$LARGE
C      DETERMINA OS ELEMENTOS DA MATRIZ DO SISTEMA OPTICO
C      a , b , c e d

PROGRAM MATRIZ
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION A(8,4),B(8,16),TETA(4),YY(4),YYL(4),P(16,16)
DIMENSION X(4,1),X0(4,1),XA(4,1),W(8,1),XM(8,8),BVI(8,1)
DIMENSION XLB(16,1),AT(4,8),BT(16,8),AX(8,1),ATM(4,8)
DIMENSION ATMW(4,1),AXW(8,1),AUXM(4),AUXP1(8),TETAL(4)
DIMENSION V(16,1),XLA(16,1),AUXP(16),
DIMENSION AUXA(8),XK(8,1),XLB0(16,1)
DIMENSION PBT(16,8),N(4),BP(8,16),ATMA(4,4),XX(4),XXL(4)
EQUIVALENCE (X0(1,1),AA),(X0(2,1),BB)
EQUIVALENCE (X0(3,1),CC),(X0(4,1),DD)

OPEN(21,FILE='PONTOS.DAT')
OPEN(22,FILE='XISZERO.DAT')
OPEN(23,FILE='MATRIZ.DAT',STATUS='NEW')
NITE=0
WRITE(23,*)' MATRIZ.DAT      ( SAIDA DO MATRIZ.FOR )'
WRITE(23,*)' '
WRITE(23,777)
FORMAT(' ','N'           Y           YL           x
1  xL')
DO 2 I=1,4
READ(21,*)N(I),YY(I),YYL(I),XX(I),XXL(I)
WRITE(23,101)N(I),YY(I),YYL(I),XX(I),XXL(I)
101  FORMAT(' ',I2,2X,F13.7,2X,F13.7,2X,F13.7,2X,F13.7)

2      CONTINUE
1      FORMAT(' ',/, ' PARAMETROS INICIAIS',/,
1, ' a = ',F12.6,8X,'b = ',F12.6,/, ' c = ',F12.6,8X,'d = ',
2F12.6,/,/, ' PESO = ',F15.6,/, ' PRECISAO DAS ITERACOES =
3',F17.9,/, ' NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = ',I4,/)
READ(22,*)(X0(I,1),I=1,4),PPP,XITE,LIM
WRITE(23,1)(X0(I,1),I=1,4),PPP,XITE,LIM
1010  AA=X0(1,1)
      BB=X0(2,1)
      CC=X0(3,1)
      DD=X0(4,1)
      IF(NITE.GT.0)GO TO 33
*****      MONTAGEM DO VETOR DAS OBSERVACOES      *****

K=0
DO 3 J=1,4
  XLB(K+1,1)=YY(J)
  XLB0(K+1,1)=YY(J)
  XLB(K+2,1)=YYL(J)
  XLB0(K+2,1)=YYL(J)
  XLB(K+3,1)=XX(J)

```

```

        XLB0(K+3,1)=XX(J)
        XLB(K+4,1)=XXL(J)
        XLB0(K+4,1)=XXL(J)
        K=K+4
3      CONTINUE
*****          MATRIZ P          *****

C      ZERANDO A MATRIZ P
        DO 9 I=1,16
            DO 9 J=1,16
                P(I,J)=0.D0
9      CONTINUE
        DO 11 I=1,16
            P(I,I)=PPP
11     CONTINUE

*****          MATRIZ A          *****

C      ZERANDO A MATRIZ A
        DO 40 I=1,8
            DO 39 J=1,4
                A(I,J)=0.D0
39     CONTINUE
40     CONTINUE

C      PRIMEIRA COLUNA
33     K=3
        DO 41 I=1,4
            A(2*I-1,1)=XLB(K,1)
            A(2*I,1)=XLB(K-2,1)
            K=K+4
41     CONTINUE

C      SEGUNDA COLUNA
        DO 42 I=1,4
            A(2*I-1,2)=1.D0
42     CONTINUE

C      TERCEIRA COLUNA
        K=4
        DO 43 I=1,4
            A(2*I-1,3)=XLB(K,1)*XLB(K-1,1)
            A(2*I,3)=XLB(K,1)*XLB(K-3,1)
            K=K+4
43     CONTINUE

C      QUARTA COLUNA
        K=4
        DO 44 I=1,4
            A(2*I-1,4)=XLB(K,1)
            K=K+4
44     CONTINUE

*****          MATRIZ B          *****

```



```

C      ZERANDO A MATRIZ B
      DO 48 I=1,8
        DO 47 J=1,16
          B(I,J)=0.
47      CONTINUE
48      CONTINUE

```

```

C      PRIMEIRA PARTE
      K=4
      DO 51 I=1,7,2
        B(I,K)=DD
        K=K+4
51      CONTINUE

```

```

C      SEGUNDA PARTE
      K=2
      DO 52 I=2,8,2
        B(I,K)=-1
        K=K+4
52      CONTINUE

```

```

C      TERCEIRA PARTE
      K=4
      DO 53 I=1,7,2
        B(I,K-1)=AA+CC*XLB(K,1)
        K=K+4
53      CONTINUE

```

```

C      QUARTA PARTE
      K=4
      DO 54 I=2,8,2
        B(I,K-3)=AA+CC*XLB(K,1)
        K=K+4
54      CONTINUE

```

```

C      QUINTA PARTE
      K=4
      DO 55 I=2,8,2
        B(I,K)=CC*XLB(K-3,1)
        K=K+4
55      CONTINUE

```

```

*****          VETOR W          *****

```

```

      DO 57 I=1,8
        W(I,1)=0.D0
57      CONTINUE

      K=4
      DO 58 I=1,4
        W(2*I-1,1)=AA*XLB0(K-1,1)+BB*XLB0(K,1)*CC*XLB0(K-1,1)
        W(2*I-1,1)=W(2*I-1,1)+XLB0(K,1)*DD
        W(2*I,1)=AA*XLB0(K-3,1)+XLB0(K,1)*CC*XLB0(K-3,1)-XLB0(K-
*2,1)
        K=K+4
58      CONTINUE
      IF(NITE.EQ.0)GO TO 59

```

```

        CALL MULTIP(B,V,BVI,8,16,1)
        DO 1011 I=1,8
            W(I,1)=W(I,1)-BVI(I,1)
1011    CONTINUE

***** OPERACOES MATRICIAIS *****

59    CALL VERSOL(P,AUXP,16)
        CALL TRANSP(B,BT,8,16)
        CALL TRANSP(A,AT,8,4)
        CALL MULTIP(B,P,BP,8,16,16)
        CALL MULTIP(BP,BT,XM,8,16,8)

*    MATRIZ " INVERSA DE M "
        CALL VERSOL(XM,AUXP1,8)
*    VETOR " X "
        CALL MULTIP(AT,XM,ATM,4,8,8)
        CALL MULTIP(ATM,A,ATMA,4,8,4)
        CALL VERSOL(ATMA,AUXM,4)
        CALL MULTIP(ATM,W,ATMW,4,8,1)
        CALL MULTIP(ATMA,ATMW,X,4,4,1)
        DO 63 K=1,4
            X(K,1)=-X(K,1)
63    CONTINUE

*    VETOR DOS CORRELATOS " K "
        CALL MULTIP(A,X,AX,8,4,1)
        CALL ADICAO(AX,W,AXW,8,1)
        CALL MULTIP(XM,AXW,XK,8,8,1)
        DO 72 I=1,8
            XK(I,1)=-XK(I,1)
72    CONTINUE

*    VETOR DOS RESIDUOS " V "
        CALL MULTIP(P,BT,PBT,16,16,8)
        CALL MULTIP(PBT,XK,V,16,8,1)

C    OBSERVACOES AJUSTADAS
        CALL ADICAO(XLB0,V,XLA,16,1)

C    PARAMETROS AJUSTADOS
        CALL ADICAO(X0,X,XA,4,1)
        IF((ABS(X(1,1)).LT.XITE).AND.(ABS(X(2,1)).LT.XITE).AND.
1      (ABS(X(3,1)).LT.XITE).AND.(ABS(X(4,1)).LT.XITE))GO TO 79
        DO 75 I=1,16
            XLB(I,1)=XLA(I,1)
75    CONTINUE
        DO 76 I=1,4
            X0(I,1)=XA(I,1)
76    CONTINUE
        DETER=X(1,1)*XA(4,1)-XA(2,1)*XA(3,1)
        IF(NITE.EQ.LIM)GO TO 79
        NITE=NITE+1
        GO TO 1010
79    WRITE(23,80)
        WRITE(*,80)
80    FORMAT(' ',15X,'RESULTADO FINAL',/)

```

```

WRITE(23,81) (XA(I,1), I=1,4), NITE
WRITE(*,81) (XA(I,1), I=1,4), NITE

81  FORMAT(' ', 2X, 'a = ', f19.10, 15X, 'b = ', f19.10, /, 3X, 'c =
1', f19.10, 15X, 'd = ', f19.10, /, /, /, ' NUMERO DE ITERACOES = ', I4)
DETER=XA(1,1)*XA(4,1)-XA(3,1)*XA(2,1)
WRITE(23,82)DETER
WRITE(*,82)DETER
82  FORMAT(' ', 'DETERMINANTE  = ', F19.10)
C    PFOCO=PFOCO+0.01
C1017  CONTINUE
STOP
END

SUBROUTINE TRANSP(A,B,I,J)
C    A - MATRIZ DE ENTRADA DIM: A(I,J)
C    B - MATRIZ DE SAIDA  DIM: B(J,I)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(I,J), B(J,I)
DO 1 N=1, I
DO 1 M=1, J
1    B(M,N)=A(N,M)
RETURN
END

SUBROUTINE MULTIP(A,B,C,I,J,K)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(I,J), B(J,K), C(I,K)
DO 1 N=1, I
DO 1 L=1, K
C(N,L)=0.D0
DO 1 M=1, J
1    C(N,L)=C(N,L)+A(N,M)*B(M,L)
CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE ADICAO(A,B,C,I,J)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(I,J), B(I,J), C(I,J)
DO 1 N=1, I
DO 1 M=1, J
1    C(N,M)=A(N,M)+B(N,M)
RETURN
END

SUBROUTINE SUBTRA(A,B,C,I,J)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(I,J), B(I,J), C(I,J)
DO 1 N=1, I
DO 1 M=1, J
1    C(N,M)=A(N,M)-B(N,M)
RETURN
END

subroutine versol (an,b,i)
c    inversao de matrizes positivas definidas
implicit real*8 (a-h)
implicit real*8 (o-z)
dimension an(i,i),b(i)
if(an(1,1).eq.0.d00)then
write(*,*)' impossivel inverter esta matriz'

```

```

return
endif
if(i.eq.1)go to 10
im=i-1
do 5 k=1,i
do 2 j=1,im
2  b(j)=an(1,j+1)/an(1,1)
  b(i)=1./an(1,1)
  do 4 l=1,im
  do 3 j=1,im
3  an(1,j)=an(l+1,j+1)-an(l+1,1)*b(j)
4  an(1,i)=-an(l+1,1)*b(i)
  do 5 j=1,i
5  an(i,j)=b(j)
  return
10 an(1,1)=1./an(1,1)
   return
end

```

ANEXO 4

```

C      PFOCO.FOR
C      Determina a profundidade de foco de um sistema.
C      Pelo arquivo FOCO.DAT e fornecida a distancia focal e a
C      posicao do objeto.O programa calcula a posicao da imagem
C      e distancia do ponto ideal de formacao da imagem ate o
C      circulo de confusao, para cada abertura usual.
C      Estes dados serao gravados no arquivo PFOCO.DAT.

      DIMENSION XNF(10)
      OPEN(20, FILE='FOCO.DAT')
      OPEN(21, FILE='PFOCO.DAT', STATUS='NEW')
      XNF(1)=1.
      XNF(2)=1.4
      XNF(3)=2.0
      XNF(4)=2.8
      XNF(5)=4.
      XNF(6)=5.6
      XNF(7)=8.
      XNF(8)=11.
      XNF(9)=16
      XNF(10)=22
      READ(20,*) FOC,P
      PL=P*FOC/(P-FOC)
      WRITE(21,*) 'PFOCO.DAT          ( SAIDA DO PFOCO.FOR ) '
      WRITE(21,*) ' '
      WRITE(*,10) FOC,P,PL
      WRITE(21,10) FOC,P,PL
10     FORMAT(' ',/,10X,'DISTANCIA FOCAL DA LENTE ( mm )
1= ',F20.5,/,/,10X,
2'DISTANCIA DO OBJETO ATE A LENTE ( mm ) =',F13.5,/,/,
3,10X,'POSICAO DA IMAGEM ( mm ) = ',F26.5,/,/)
      WRITE(21,*) '          ABERTURA          PROF. DE FOCO '
      WRITE(*,*) '          ABERTURA          PROF. DE FOCO '
      DO 20 I=1,10
          X=0.5*PL/(XNF(I)*FOC)

          WRITE(21,11)XNF(I),X
          WRITE(*,11)XNF(I),X
20     CONTINUE

11     FORMAT(' ',/,15X,F8.2,5X,F12.6,1X,'mm')
      STOP
      END

```

ANEXO 5

```

C      MATQUI.FOR

$LARGE
C      DETERMINA OS ELEMENTOS DA MATRIZ DO SISTEMA OPTICO
C      INTRODUZ ERROS NAS OBSERVACOES E FAZ OS TESTES ESTATISTICOS
C      a , b , c e d

PROGRAM MATRIZ
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(8,4),B(8,16),TETA(4),YY(4),YYL(4),P(16,16)
DIMENSION X(4,1),X0(4,1),XA(4,1),W(8,1),XM(8,8),BVI(8,1)
DIMENSION XLB(16,1),AT(4,8),BT(16,8),AX(8,1),ATM(4,8)
DIMENSION ATMW(4,1),AXW(8,1),AUXM(4),AUXP1(8),TETAL(4)
DIMENSION V(16,1),XLA(16,1),AUXP(16),AUXA(8)
DIMENSION XK(8,1),XLB0(16,1)
DIMENSION PBT(16,8),N(4),BP(8,16),ATMA(4,4),XX(4),XXL(4)
EQUIVALENCE (X0(1,1),AA),(X0(2,1),BB)
EQUIVALENCE (X0(3,1),CC),(X0(4,1),DD)

OPEN(21,FILE='PONTOS.DAT')
OPEN(22,FILE='XISZERO.DAT')
OPEN(24,FILE='SISTQUI.DAT')
OPEN(23,FILE='MATQUI.DAT',STATUS='NEW')
NITE=0
WRITE(23,*)' MATRIZ.DAT      ( SAIDA DO MATRIZ.FOR )'
WRITE(23,*)' '
WRITE(23,777)
777  FORMAT(' ','N          Y          YL          x
1  xL')
DO 2 I=1,4
READ(21,*)N(I),YY(I),YYL(I),XX(I),XXL(I)
WRITE(23,101)N(I),YY(I),YYL(I),XX(I),XXL(I)
101  FORMAT(' ',I2,2X,F13.7,2X,F13.7,2X,F13.7,2X,F13.7)

2  CONTINUE
READ(24,*)AEQ,BEQ,CEQ,DEQ,DELTAEQ
1  FORMAT(' ',/, ' PARAMETROS INICIAIS',/,
1, ' a = ',F12.6,8X,'b = ',F12.6,/, ' c = ',F12.6,8X,'d = ',
2F12.6,/,/, ' PESO = ',F15.6,/, ' PRECISAO DAS ITERACOES =
3',F17.9,/,/, ' NUMERO MAXIMO DE ITERACOES = ',I4,/)
READ(22,*)(X0(I,1),I=1,4),PPP,XITE,LIM
WRITE(23,1)(X0(I,1),I=1,4),PPP,XITE,LIM
1010 AA=X0(1,1)
BB=X0(2,1)
CC=X0(3,1)
DD=X0(4,1)
IF(NITE.GT.0)GO TO 33
*****      MONTAGEM DO VETOR DAS OBSERVACOES      *****

K=0
DO 3 J=1,4
XLB(K+1,1)=YY(J)
XLB0(K+1,1)=YY(J)
XLB(K+2,1)=YYL(J)

```

```

        XLB0(K+2,1)=YYL(J)
        XLB(K+3,1)=XX(J)
        XLB0(K+3,1)=XX(J)
        XLB(K+4,1)=XXL(J)
        XLB0(K+4,1)=XXL(J)
        K=K+4
3      CONTINUE
*****          MATRIZ P          *****

C      ZERANDO A MATRIZ P
        DO 9 I=1,16
            DO 9 J=1,16
                P(I,J)=0.D0
9      CONTINUE
        DO 11 I=1,16
            P(I,I)=PPP
11     CONTINUE

*****          MATRIZ A          *****

C      ZERANDO A MATRIZ A
        DO 40 I=1,8
            DO 39 J=1,4
                A(I,J)=0.D0
39     CONTINUE
40     CONTINUE

C      PRIMEIRA COLUNA
33     K=3
        DO 41 I=1,4
            A(2*I-1,1)=XLB(K,1)
            A(2*I,1)=XLB(K-2,1)
            K=K+4
41     CONTINUE

C      SEGUNDA COLUNA
        DO 42 I=1,4
            A(2*I-1,2)=1.D0
42     CONTINUE

C      TERCEIRA COLUNA
        K=4
        DO 43 I=1,4
            A(2*I-1,3)=XLB(K,1)*XLB(K-1,1)
            A(2*I,3)=XLB(K,1)*XLB(K-3,1)
            K=K+4
43     CONTINUE

C      QUARTA COLUNA
        K=4
        DO 44 I=1,4
            A(2*I-1,4)=XLB(K,1)
            K=K+4
44     CONTINUE
*****          MATRIZ B          *****

C      ZERANDO A MATRIZ B

```

```

      DO 48 I=1,8
        DO 47 J=1,16
          B(I,J)=0.
47      CONTINUE
48      CONTINUE

C      PRIMEIRA PARTE
      K=4
      DO 51 I=1,7,2
        B(I,K)=DD
        K=K+4
51      CONTINUE

C      SEGUNDA PARTE
      K=2
      DO 52 I=2,8,2
        B(I,K)=-1
        K=K+4
52      CONTINUE

C      TERCEIRA PARTE
      K=4
      DO 53 I=1,7,2
        B(I,K-1)=AA+CC*XLB(K,1)
        K=K+4
53      CONTINUE

C      QUARTA PARTE
      K=4
      DO 54 I=2,8,2
        B(I,K-3)=AA+CC*XLB(K,1)
        K=K+4
54      CONTINUE

C      QUINTA PARTE
      K=4
      DO 55 I=2,8,2
        B(I,K)=CC*XLB(K-3,1)
        K=K+4
55      CONTINUE

*****          VETOR W          *****

      DO 57 I=1,8
        W(I,1)=0.D0
57      CONTINUE

      K=4
      DO 58 I=1,4
        W(2*I-1,1)=AA*XLB0(K-1,1)+BB*XLB0(K,1)*CC*XLB0(K-1,1)
        W(2*I-1,1)=W(2*I-1,1)+XLB0(K,1)*DD
        W(2*I,1)=AA*XLB0(K-3,1)+XLB0(K,1)*CC*XLB0(K-3,1)-XLB0(K-
*2,1)
        K=K+4
58      CONTINUE
      IF(NITE.EQ.0)GO TO 59
      CALL MULTIP(B,V,BVI,8,16,1)

```



```

      DO 1011 I=1,8
        W(I,1)=W(I,1)-BVI(I,1)
1011  CONTINUE

***** OPERACOES MATRICIAIS *****

59    CALL VERSOL(P,AUXP,16)
      CALL TRANSP(B,BT,8,16)
      CALL TRANSP(A,AT,8,4)
      CALL MULTIP(B,P,BP,8,16,16)
      CALL MULTIP(BP,BT,XM,8,16,8)

*     MATRIZ " INVERSA DE M "
      CALL VERSOL(XM,AUXP1,8)
*     VETOR " X "
      CALL MULTIP(AT,XM,ATM,4,8,8)
      CALL MULTIP(ATM,A,ATMA,4,8,4)
      CALL VERSOL(ATMA,AUXM,4)
      CALL MULTIP(ATM,W,ATMW,4,8,1)
      CALL MULTIP(ATMA,ATMW,X,4,4,1)
      DO 63 K=1,4
        X(K,1)=-X(K,1)
63    CONTINUE

*     VETOR DOS CORRELATOS " K "
      CALL MULTIP(A,X,AX,8,4,1)
      CALL ADICAO(AX,W,AXW,8,1)
      CALL MULTIP(XM,AXW,XK,8,8,1)
      DO 72 I=1,8
        XK(I,1)=-XK(I,1)
72    CONTINUE

*     VETOR DOS RESIDUOS " V "
      CALL MULTIP(P,BT,PBT,16,16,8)
      CALL MULTIP(PBT,XK,V,16,8,1)

C     OBSERVACOES AJUSTADAS
      CALL ADICAO(XLB0,V,XLA,16,1)

C     PARAMETROS AJUSTADOS
      CALL ADICAO(X0,X,XA,4,1)
      IF((ABS(X(1,1)).LT.XITE).AND.(ABS(X(2,1)).LT.XITE).AND.
1(ABS(X(3,1)).LT.XITE).AND.(ABS(X(4,1)).LT.XITE))GO TO 79
      DO 75 I=1,16
        XLB(I,1)=XLA(I,1)
75    CONTINUE
      DO 76 I=1,4
        X0(I,1)=XA(I,1)
76    CONTINUE
      DETER=XA(1,1)*XA(4,1)-XA(2,1)*XA(3,1)
      IF(NITE.EQ.LIM)GO TO 79
      NITE=NITE+1
      GO TO 1010
79    WRITE(23,80)
      WRITE(*,80)
80    FORMAT(' ',15X,'RESULTADO FINAL',/)
      WRITE(23,81)(XA(I,1),I=1,4),NITE

```

```

WRITE(*,81)(XA(I,1),I=1,4),NITE

81  FORMAT(' ',2X,'a = ',f19.10,15X,'b = ',f19.10,/,3X,'c =
1',f19.10,15X,'d = ',f19.10,/,/,/, ' NUMERO DE ITERACOES = ',I4)
DETER=XA(1,1)*XA(4,1)-XA(3,1)*XA(2,1)
WRITE(23,82)DETER
WRITE(*,82)DETER
82  FORMAT(' ', 'DETERMINANTE  = ',F19.10)
C   PFOCO=PFOCO+0.01
C1017 CONTINUE
C   TESTE ESTATISTICO "QUI-QUADRADO"
QUI=((XA(1,1)-AEQ)**2)/AEQ+((XA(2,1)-BEQ)**2)/BEQ
QUI=QUI+((XA(3,1)-CEQ)**2)/CEQ+((XA(4,1)-DEQ)**2)/DEQ
QUI=QUI+((DETER-DELTAEQ)**2)/DELTAEQ
WRITE(23,177)QUI
177 FORMAT(' ',/, 'VALOR DE QUI-QUADRADO = ',F8.4,/)

STOP
END

SUBROUTINE TRANSP(A,B,I,J)
C   A - MATRIZ DE ENTRADA DIM: A(I,J)
C   B - MATRIZ DE SAIDA  DIM: B(J,I)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(I,J),B(J,I)
DO 1 N=1,I
DO 1 M=1,J
1   B(M,N)=A(N,M)
RETURN
END

SUBROUTINE MULTIP(A,B,C,I,J,K)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(I,J),B(J,K),C(I,K)
DO 1 N=1,I
DO 1 L=1,K
C(N,L)=0.D0
DO 1 M=1,J
1   C(N,L)=C(N,L)+A(N,M)*B(M,L)
CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE ADICAO(A,B,C,I,J)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(I,J),B(I,J),C(I,J)
DO 1 N=1,I
DO 1 M=1,J
1   C(N,M)=A(N,M)+B(N,M)
RETURN
END

SUBROUTINE SUBTRA(A,B,C,I,J)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(I,J),B(I,J),C(I,J)
DO 1 N=1,I
DO 1 M=1,J
1   C(N,M)=A(N,M)-B(N,M)
RETURN
END

subroutine versol (an,b,i)

```

```

c      inversao de matrizes positivas definidas
      implicit real*8 (a-h)
      implicit real*8 (o-z)
      dimension an(i,i),b(i)
      if(an(1,1).eq.0.d00)then
      write(*,*)' impossivel inverter esta matriz'
      return
      endif
      if(i.eq.1)go to 10
      im=i-1
      do 5 k=1,i
      do 2 j=1,im
2      b(j)=an(1,j+1)/an(1,1)
      b(i)=1./an(1,1)
      do 4 l=1,im
      do 3 j=1,im
3      an(1,j)=an(l+1,j+1)-an(l+1,1)*b(j)
4      an(1,i)=-an(l+1,1)*b(i)
      do 5 j=1,i
5      an(i,j)=b(j)
      return
10     an(1,1)=1./an(1,1)
      return
      end

```

ANEXO 6

LENTE.DAT

120., -150., 18., 1.5

ANEXO 7

RELAT.DAT (RELATORIO DO SISTEMA.FOR)

RAIO DE CURVATURA DA PRIMEIRA FACE (mm) = 120.000
 RAIO DE CURVATURA DA SEGUNDA FACE (mm) = -150.000
 ESPESSURA DA LENTE (mm) = 18.000
 INDICE DE REFRACAO = 1.5000
 DISTANCIA FOCAL DA LENTE (mm): f = 133.333333

MATRIZ DA PRIMEIRA REFRACAO

1.00000000	.00000000
-.00277778	.66666667

MATRIZ DA SEGUNDA REFRACAO

1.00000000	.00000000
-.00333333	1.50000000

MATRIZ DE TRANSMISSAO

1.00000000	18.00000000
.00000000	1.00000000

MATRIZ DO SISTEMA OPTICO

.95000000	12.00000000
-.00733333	.96000000

DETERMINANTE DA MATRIZ DO SISTEMA OPTICO

DELTA = 1.0000000000000000

ANEXO 8

SISTEMA.DAT

9.500000000000000E-001	12.000000000000000 -7.33333333333333E-
003	
9.600000000000000E-001	

ANEXO 9

PTOBJ.DAT

```
500.,5.,0.0,  
1698.,12.,0.82,  
2000,-80.,1.5,  
3245.,-43.,0.22,
```

ANEXO 10

PONTOS.DAT

1,	5.00000,	-1.84729,	500.00000,	179.92611
2,	12.00000,	-1.04420,	1698.00000,	141.41142
3,	-80.00000,	5.83658,	2000.00000,	139.49416
4,	-43.00000,	1.88294,	3245.00000,	135.51671

ANEXO 11

XISZERO.DAT

```
1.D0  
1.D0  
1.D0  
1.D0  
1000.D0  
0.0001D0  
5
```

ANEXO 12

Moore M-18 5-Axis CNC Universal Coordinate Measuring Machine

The Moore M-18 Universal Coordinate Measuring Machine has up to five servo-controlled, programmable axes—three linear (X-, Y-, and Z-axes) and two rotary (C-axis "normalcy" and optional rotary table A-axis). A laser measuring system is used for the three linear axes, with optical encoders for the two rotary axes.

Measuring Range

X-Axis 460 mm (18 in.)
Y-Axis 280 mm (11 in.)
Z-Axis 355 mm (14 in.)
C-Axis 360 degrees

Positioning Accuracy (X-, Y-, or Z-axes)

0.6 μm (0.000024 in.)

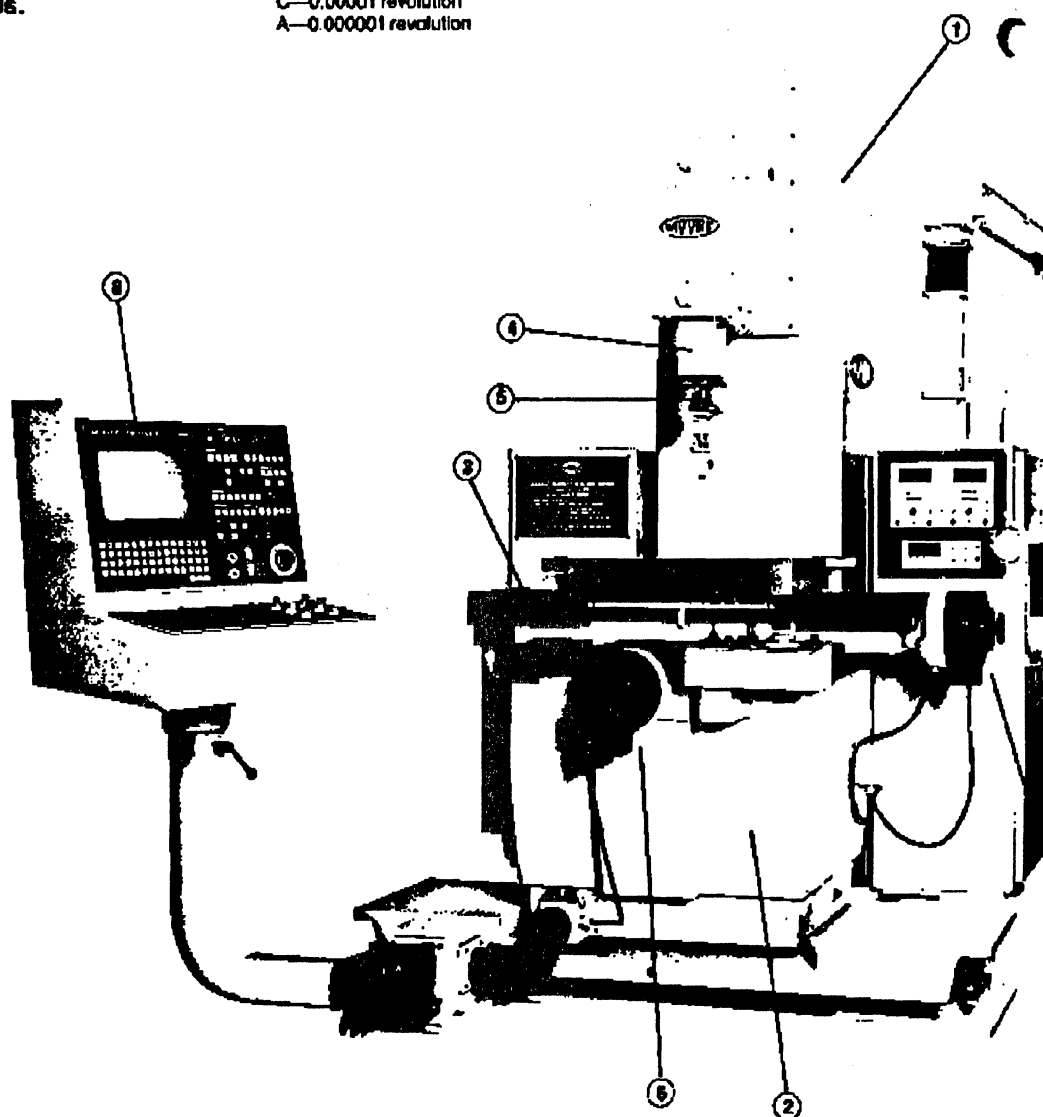
Linear Axis Repeatability

$\pm 0.15 \mu\text{m}$ (± 0.000006 in.)

Resolution

X—0.01 μm (0.000001 in.)	} when used in inch mode
Y—0.01 μm (0.000001 in.)	
Z—0.01 μm (0.000001 in.)	
C—0.00001 revolution	
A—0.000001 revolution	

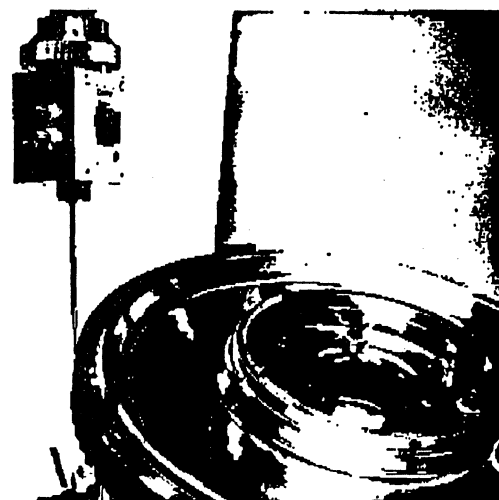
① Single Fixed-Column Configuration
Stiffness, minimum effects of temperature stratification.



Applications



Gage Laboratory Certification of master gage.



High-precision production inspection of turbine disc.

Principal Specifications

Moore M-18 5-Axis CNC Universal Coordinate Measuring Machine

Capacity

Measuring Range	X-Axis	490 mm (18 in.)
	Y-Axis	290 mm (11 in.)
	Z-Axis	355 mm (14 in.)
	C-Axis	360 degrees

Clamping Surface	610 x 355 mm (24 x 14 in.)
------------------	----------------------------

Maximum Clearance Under Z-Axis (Z-Axis Fully Retracted, without Probe)	580 mm (22 in.) 712 mm (28 in.) with 152 mm (6 in.) riser
--	---

Permissible Workpiece Weight	250 Kg (550 lbs.)
------------------------------	-------------------

Accuracy (Maximum Range of Deviation)

Volumetric Accuracy (Based on Angled Step Gage)	$\pm 1 \mu\text{m}$ (0.000040 in.)
--	------------------------------------

Linear Positioning Accuracy (X-, Y-, or Z-Axis)	$0.8 \mu\text{m}$ (0.000024 in.)
--	----------------------------------

Contouring Accuracy 200 mm (8 in.) ring gage interpolated in the X-Y plane	$1.5 \mu\text{m}$ (0.000050 in.)
--	----------------------------------

Radial and Axial Motion (Spindle)	$0.125 \mu\text{m}$ (0.000005 in.)
-----------------------------------	------------------------------------

Straightness of Travel, X-, Y-, and Z-Axis (full travel)	$0.6 \mu\text{m}$ (0.000024 in.)
---	----------------------------------

Squareness of Travel, X- to Y-Axis	0.3 arc second deviation from 90 degrees
------------------------------------	---

Squareness of Travel, X- to Z-Axis and Y- to Z-Axis	0.4 arc second deviation from 90 degrees
--	---

Parallelism of Table Top to X- and Y-Axis Travels	$0.8 \mu\text{m}$ (0.000024 in.)
--	----------------------------------

Linear Axis Repeatability	$\pm 0.15 \mu\text{m}$ (± 0.000006 in.)
---------------------------	--

Program Resolution

X— $0.01 \mu\text{m}$ (0.000001 in.)	when used in inch mode
Y— $0.01 \mu\text{m}$ (0.000001 in.)	
Z— $0.01 \mu\text{m}$ (0.000001 in.)	
C—0.00001 revolution	
A—0.000001 revolution	

Services Required

Power	6 KVA max. for entire system, 208, 220, 440, 480 volts; 50-60 Hz; Maximum allowable transient, $\pm 10\%$
-------	--

Air	6 bar, 75 liters/minute
-----	-------------------------

Environment	$20^\circ\text{C} \pm 1/4^\circ\text{C}$ ($68^\circ\text{F} \pm 1/2^\circ\text{F}$); 55% relative humidity, max.
-------------	---

Weight and Floor Area

Equipment Weight, approx. (Machine and Controls)	3750 Kg (8250 lbs.)
---	---------------------

Floor Area Required, approx. (Machine and Controls)	5300 x 3050 x 3050 mm (17 x 10 x 10 ft.)
--	---



Moore Special Tool Co., Inc., 800 Junior Ave
P.O. Box 4088, Bridgeport, CT 06607-0088 U.S.A. 203-366-3224
European subsidiary: Moore Special Tool AG, Hohlstrasse 608, 8048 Zürich, Switzerland

ANEXO 13

Leitz PMM precision gantry machines – another example of Leitz' continuing strategy of innovation

The Leitz PMM gantry machines were specifically designed for highly precise measurement, especially of large and heavy components, allowing better utilisation of function tolerances. Used together with the QUINDOS® software system, they lead to shorter downtimes in production.

For Leitz, innovation means combining proven technologies to create systems which open up completely new opportunities, ranging from pure optics to computers

As an innovator in modern technology, Leitz offers practical solutions to a variety of problems. In INDUSTRIAL METROLOGY, MICROSCOPY, SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY and IMAGE ANALYSIS.

For further information, contact the Leitz agency for your region.

Ernst Leitz Wetzlar GmbH



P.O. Box 2020, D-8330 Wetzlar,
Tel (0364 41) 29-0, Telex 483 549 leiz d

® = registered trademark

Design and specifications subject to alteration without notice

Order Nos. of the editions in
English 916 163 German 918 164

French

Spanish

Part No. 810-132 Engl

Printed in West Germany

V1871AX/az

Probe system	Simultaneous measurement on all three axes Dynamic single point probing and continuous scanning Resolution 0.1 µm Maximum probe pin weight 0.8 kg automatic weight compensation
Drives	pay-free gears through controlled DC motors
Collision protection	for probe pins, probe head housing and spindle sleeve
Linear measuring systems	electro-optical incremental linear transducer, resolution 0.1 µm
Bearings	Air bearings with large guide base

**Linear measuring uncertainty for e.g.
PMM 302010:**

$$U_1 = 2,0 + \frac{1}{250} \cdot \frac{L}{\text{mm}} \quad [\mu\text{m}]$$

Measuring uncertainty (according to VDI/VDE 2617) for the determination of a distance L, parallel to an instrument axis, by means of two probings with spherical probes from the standard probe range (without extension) complying with the setting-up conditions, if necessary with temperature compensation

$$U_3 = 3,0 + \frac{1}{150} \cdot \frac{L}{\text{mm}} \quad [\mu\text{m}]$$

Measuring uncertainty (according to VDI/VDE 2617) for the determination of a distance L, diagonal in the measuring space, by means of two probings with spherical probes from the standard probe range (without extension) complying with the setting-up conditions, if necessary with temperature compensation

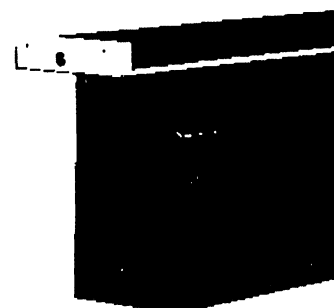
Measuring ranges in mm:

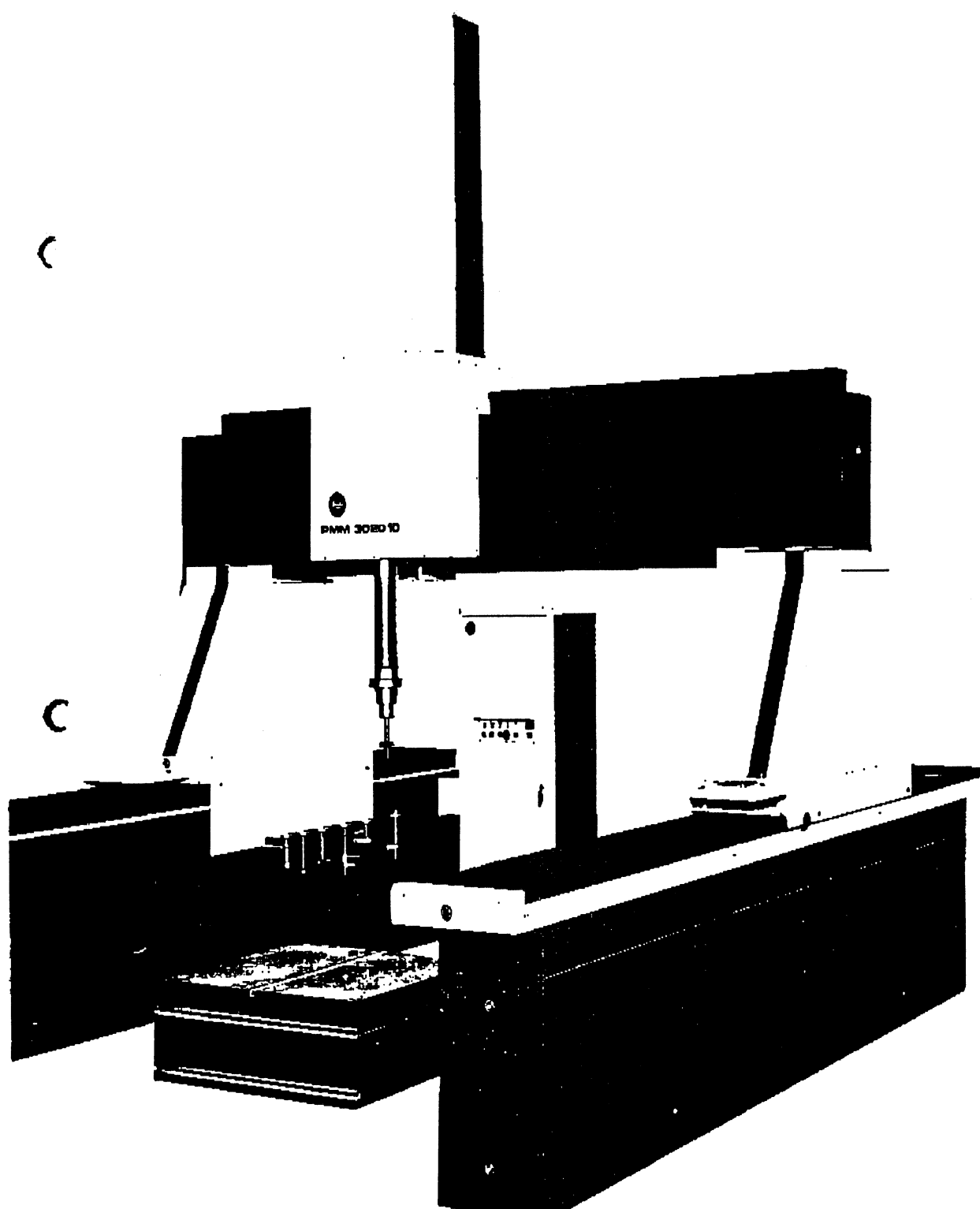
X = 3000, 4500, 6000, 8000, 10000
 Y = 2000, 3000
 Z = 1000

X = 3000, 4500, 6000, 8000, 10000
 Y = 2000, 3000
 Z = 1600

X = 3000, 4500, 6000, 8000, 10000
 Y = 2000, 3000, 3800
 Z = 2500

Type designation: e.g. PMM 302010 has a measuring range of X = 3000mm, Y = 2000mm, Z = 1000mm





REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, Marcelo; FINN, Edward J. **Física um curso universitário**. São Paulo : Edgar Blücher, 1972, v.2.
- BAKER, Wilfred H. **Elements of photogrammetry**. [s.l.] : The Ronald Press, 1960.
- BLACKWOOD, Oswald H.; KELLY, Willians C.; BELL, Raymond M. **General physics**. 3. ed. New York : John Wiley, 1963.
- BEZERRA, Manoel J.; **Curso de matemática**. 17. ed. São Paulo : Companhia Editora Nacional, 1965.
- BORN, Max; WOLF, Emil. **Principles of optics**. 2. ed. New York : Pergamon Press, 1964.
- DALMOLIN, Quintino. **Ajustamento de observações pelo processo iterativo**. Curitiba, 1976. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- DITCHBURN, R. W. **Light**. Great Britain : Blackie, 1976, v.1.
- EISBERG, Robert M.; LERNER, Lawrence S. **Física, fundamentos e aplicações**. São Paulo: McGraw-Hill, 1983. v.4.
- EISBERG, Robert M.; LERNER, Lawrence S. **Physics, foundations and applications, combined volume**. New York : McGraw-Hill, 1981.
- FAGGION, Pedro L. **Contribuição para a implantação de um sistema de aferição de miras na Universidade Federal do Paraná**. Curitiba, 1993. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- FOTOGRAFIA; **manual completo de arte e técnica**. [s.l.] : Abril Cultural, 1978.
- GEMAEL, Camil. **Aplicações do cálculo matricial em geodésia**. Parte 2; Ajustamento de observações. Curitiba : Universidade Federal do Paraná, 1974.
- HALBACH, Klaus. Matrix representation of gaussian optics, **American Journal of Physics**. v.32, p. 90-108, 1964.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Física**. Parte II. Rio de Janeiro : Ao Livro Técnico, 1966.
- HALLERT, Bertil . **Photogrammetry, basic principles and general survey**. New York : McGraw Hill Book, 1960,

HARDY, Arthur C.; PERRIN, Fred H. **The principles of optics**. New York : McGraw-Hill, 1934.

HECHT, Eugene. **Optics**. 2. ed. Massachusetts : Addison-Wesley , 1990

LOHNES, Paul R.; COOLEY William W. **Introduction to statistical procedures with computer exercices**. New York : John Wiley, 1968.

MANUAL of photogrammetry. 4. ed. Falls Church, Va. : American Society of Photogrammetry, 1980.

MILLS, Frederick C. **Statistical methods**. 3.ed. New York : Henry Holtz, 1995.

MIRSHAWKA, Victor. **Tabelas de estatística**. 4.ed. São Paulo : Livraria Nobel, 1984.

OLIVAS, Mary A. A. **Calibração de câmaras fotogramétricas : câmaras convergentes e campos mistos**. Curitiba, 1980. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

WOLF, Paul R. **Elements of fotogrammetry**. 2. ed. New York : McGraw-Hill, 1974.